

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra Energetiky

Návrh úprav kotle K3 v Teplárně Olomouc pro

snížení emisí SO_2

Proposal of Modifications of the Boiler K3 in Olomouc Heat
Plant to Reduce SO_2 Emission

Student:

Bc. Pavel Bukva

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Bohumír Čech

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Pavel Bukva**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení

Téma: **Návrh úprav kotle K3 v Teplárně Olomouc pro snížení emisí SO₂**
Proposal of Modifications of the Boiler K3 in Olomouc Heat Plant to
Reduce SO₂ Emissions

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Vypracujte návrh odsířovacího zařízení pro kotel K3 v Teplárně Olomouc spalující hnědé uhlí. Odsíření musí splňovat emisní limity platné po roce 2021.

1. Proved'te rešerši možných odsířovacích způsobů pro teplárenské zdroje.
2. Proved'te hmotovou bilanci pro zadaný energetický zdroj.
3. Vypracujte koncepční návrh odsířovacího zařízení ve vazbě na prostorovou dispozici teplárenského zdroje.
4. Vypracujte technologické schéma odsířovacího zařízení.
5. Vypracujte výkresovou dokumentaci přípravy sorbentu.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] JANEBA, J., KARTÁK, K., Výpočty kotlů a parogenerátorů. 1. vyd. Praha: ČVUT 1985 . 83 s
[2] RAJNIAK, I. a kol. Tepelno-energetické a emisné merania, Istre Science, Bratislava 97. ISBN 80-88683-20-3
[3] Zprávy katedry energetiky VŠB-TU Ostrava.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Bohumír Čech**

Datum zadání: 31.10.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016




prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové (bakalářské) práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 16.5.2016

Bulha Pavel

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было с́еднано, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- было с́еднано, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Pavel Bukva

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Mezice 76, Náklo, 78332

V Ostravě : 16.5.2016

Bukva Pavel podpis

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

BUKVA, P. Návrh úprav kotle K3 v Teplárně Olomouc pro snížení emisí SO₂: diplomová práce. Ostrava: VŠB- Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2016, 74 s. Vedoucí práce: Čech B.

Diplomová práce se zabývá problematikou omezení emisí SO₂ Teplárny Olomouc. Na začátku práce jsem stručně nastínil nové legislativní zákony a s tím spojené nutné úpravy teplárenského zdroje, vznik emisí SO₂ a popsal několik nejpoužívanějších metod pro omezení oxidů síry. Praktická část práce je věnována návrhu odsíření kotle K3 suchou metodou pomocí hydrogenuhličitanu sodného. Návrh se týká především technologické části procesu, tedy výpočtu účinnosti spalování kotle K3, množství potřebného hydrogenuhličitanu sodného s přihlédnutím k možnosti spalování hnědého uhlí a pneumatické dopravy bikarbonátu sodného do místa aplikace. Součástí práce je i výkresová dokumentace navržené trasy.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

BUKVA, P. Proposal of Modifications of the Boiler K3 in Olomouc Heat Plant to Reduce SO₂ Emission: Master Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy, 2016, 74 s. Thesis head: Čech, B.

This thesis deal with the limitation of emissions of SO₂ from Heating Plant Olomouc. At the beginning I briefly outlined the new legislative laws and the related with necessary adjustment heat generation source, the formation of SO₂ and described several most commonly used methods for reducing sulfur oxides. The practical part is devoted to the design desulfurization of boiler K3 using the dry method using sodium bicarbonate. The proposal concerns mainly the technological part of the process, thus calculating the combustion efficiency of the boiler K3 quantity necessary bicarbonate with regard to the possibility of combustion of brown coal and pneumatic transport of sodium bicarbonate into the application site. The work also includes drawings proposed road.

Poděkování

Tuto práci by nebylo možné vypracovat bez pomoci pana doc. Dr. Ing. Bohumíra Čecha. Velké díky mu patří za ochotu, cenné rady a pomoc v průběhu práce. Stejně tak děkuji pracovníkům Teplárny Olomouc za pomoc při řešení tématu mé diplomové práce. Tato diplomová práce vznikla s podporou infrastruktury centra ENET.

Obsah

1	Úvod	13
2	Legislativa v oblasti ochrany ovzduší	15
2.1	Národní program snižování emisí České Republiky	17
2.2	Přechodný národní plán	18
3	Snižování emisí SO ₂	20
3.1	Oxidy síry a jejich vliv na životní prostředí	20
3.2	Síra v palivu	20
3.3	Metody snižování emisí SO ₂	21
3.3.1	Mokrý vápencová vypírka	22
3.3.2	Polosuchá vápencová vypírka	24
3.3.3	Suchá vápencová metoda	26
3.3.4	Odsíření pomocí sody bikarbony	27
3.3.5	Použitelnost jednotlivých metod	30
3.4	Produkty odsíření	31
4	Praktická část diplomové práce	33
4.1	Práškový granulační kotel K3	33
4.2	Soda bikarbona	34
4.3	Čištění spalin pomocí sody bikarbony	36
4.4	Faktory ovlivňující účinnosti čištění spalin pomocí sody bikarbony	36
4.5	Použití TRONY	36
4.6	Účinnosti čištění spalin pomocí sody bikarbony	36
4.7	Klasické uspořádání aplikace čištění spalin pomocí sody bikarbony	37
4.8	Okrajové podmínky návrhu odsíření	39
4.8.1	Dosahované hodnoty emisí	39
4.8.2	Teploty spalin v zadním tahu kotle a za kotlem	40
4.9	Reakční doba	44

4.10	Stechiometrické výpočty	45
4.11	Bilanční výpočet potřebného množství NaHCO_3 k odsíření SO_2	53
4.12	Návrh technologie odsíření pomocí sody bikarbony	57
4.12.1	PI diagram.....	57
4.12.2	Situování technologie	57
4.12.3	Velikost síla	59
4.13.4	Doprava sody bikarbony ze síla do mlýnu	60
4.13.5	Úprava sody bikarbony mletím	61
4.13.6	Doprava sody bikarbony do kotle.....	63
4.13.7	Návrh pneumatické dopravy	64
4.13.8	Elektro.....	66
4.13.9	MaR a řídicí systém kotle	67
5	Závěr.....	69
6	Citovaná literatura	70

Seznam použitého značení

C	Podíl uhlíku v palivu	[%]
$C_{SO_2}^{in}$	Vstupní koncentrace SO ₂	[mg.Nm ⁻³]
$C_{SO_2}^{out}$	Výstupní koncentrace SO ₂	[mg.Nm ⁻³]
C_H	Součinitel naklonění šneku	[-]
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav	[-]
D ₁	Průměr šneku 1	[m]
D ₂	Průměr šneku 2	[m]
EKO I	Ekonomizér	[-]
H	Podíl vodíku v palivu	[%]
$I_S^{t,\alpha}$	Entalpie spalín	[kJ.kg ⁻¹]
I_V^t	Entalpie vzduchu	[kJ.kg ⁻¹]
IPPC	Integrovaná prevence a omezení znečištění ovzduší	[-]
K3	Kotel K3	[-]
M_{pal100}	Množství paliva – 100 t/h	[kg.s ⁻¹]
M_{pal45}	Množství paliva – 45 t/h	[kg.s ⁻¹]
M _O	Průtok média - odluh	[kg.s ⁻¹]
M _{pp}	Průtok média - ostrá pára	[kg.s ⁻¹]
M _v	Průtok média - vstřikovací odluh	[kg.s ⁻¹]
N _V	Molární objem ideálního plynu	[Nm ³]
N	Podíl dusíku v palivu	[%]
O	Podíl kyslíku v palivu	[%]
OFA	Dohořivací vzduch	[-]
PNP	Přechodný národní plán	[-]
P_{el}^1	Výkon motoru šneku 1	[kW]
P_{el}^2	Výkon motoru šneku 2	[kW]
$Q_{i,red}$	Redukovaná výhřevnost paliva	[kJ.kg ⁻¹]
$Q_{v,potř}^1$	Objemový dopravní výkon šneku 1	[m ³ .h ⁻¹]
$Q_{v,potř}^2$	Objemový dopravní výkon šneku 2	[m ³ .h ⁻¹]
Q_{V100}	Vyrobené teplo v páře – 100 t/h	[kJ.s ⁻¹]
Q_{V45}	Vyrobené teplo v páře – 45 t/h	[kJ.s ⁻¹]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
REZZO	Registr emisí zdrojů znečištění ovzduší	[-]
SNCR	Selektivní nekatalitická redukce	[-]

S	Podíl síry v palivu	[%]
TZL	Tuhé znečišťující látky	[-]
V_{Ar}	Objem argonu ve spalínách	$[Nm^3.kg^{-1}]$
V_{CO_2}	Objem CO ₂ ve spalínách	$[Nm^3.kg^{-1}]$
$V_{H_2O}^S$	Objem H ₂ O ve spalínách	$[Nm^3.kg^{-1}]$
$V_{H_2O}^V$	Podíl vodní páry	$[Nm^3.kg^{-1}]$
V_{N_2}	Objem N ₂ ve spalínách	$[Nm^3.kg^{-1}]$
V_{O_2min}	Minimální objem kyslíku	$[Nm^3.kg^{-1}]$
V_{SO_2}	Objem SO ₂ ve spalínách	$[Nm^3.kg^{-1}]$
$V_{4,6\%,O_2}$	Tok vlhkých spalín při 4,6 % O ₂	$[Nm^3.h^{-1}]$
$V_{6\%O_2N}^R$	Tok vlhkých spalín při reálných podmínkách a referenční hodnotě O ₂ = 6%	$[m^3.s^{-1}]$
$V_{6\%O_2such}$	Tok suchých spalín při reálných podmínkách a referenční hodnotě O ₂ = 6%	$[m^3.s^{-1}]$
$V_{SS,min}$	Objem suchých spalín	$[Nm^3.kg^{-1}]$
$V_{SV,min}$	Objem vlhkých spalín	$[Nm^3.kg^{-1}]$
V_{SV}	Objem spalín	$[Nm^3.kg^{-1}]$
$V_{VS,min}$	Minimální objem suchého vzduchu	$[Nm^3.kg^{-1}]$
$V_{VV,min}$	Minimální objem vlhkého vzduchu	$[Nm^3.kg^{-1}]$
V_{VV}	Skutečný objemu vzduchu	$[Nm^3.kg^{-1}]$
\dot{V}	Množství dopravovaného vzduchu	$[m^3.h^{-1}]$
Z_{k100}	Ztráta citelným t. při výkonu 100 t/h	[%]
Z_{k45}	Ztráta citelným t. při výkonu 45 t/h	[%]
Z_{sv100}	Ztráta sáláním při výkonu 100 t/h	[%]
Z_{sv45}	Ztráta sáláním při výkonu 45 t/h	[%]
c_{pv}	Měrná tepelná kapacita paliva	$[kJ.kg^{-1}.K^{-1}]$
i_{nv}	Entalpie napájecí vody	$[kJ.kg^{-1}]$
i_{pp}	Ostrá pára	$[kJ.kg^{-1}]$
i_v	Entalpie vstřikovacího odluhu	$[kJ.kg^{-1}]$
i_w	Entalpie odluhu	$[kJ.kg^{-1}]$
\dot{i}_{pv}	Teplo přivedené cizím zdrojem	$[kJ.kg^{-1}]$
$\dot{m}_{SO_2vyst}^R$	Tok SO ₂ z odsiřovacího zařízení, celoroční provoz	$[kg.hod^{-1}]$
$\dot{m}_{SO_2,o}^{1500}$	Množství SO ₂ k odsíření - omezený provoz	$[kg.hod^{-1}]$
$\dot{m}_{SO_2,o}^{R,45}$	Množství SO ₂ k odsíření	$[kg.hod^{-1}]$

$\dot{m}_{SO_2,o}^R$	Množství SO ₂ k odsíření - celoroční provoz	[kg.hod ⁻¹]
$\dot{m}_{SO_2,vst}$	Tok SO ₂ do odsiřovacího zařízení	[kg.h ⁻¹]
$\dot{m}_{SO_2,výst}^{1500}$	Tok SO ₂ z odsiřovacího zařízení – omezený provoz	[kg.h ⁻¹]
$\dot{m}_{SO_2,výst}^R$	Tok SO ₂ z odsiřovacího zařízení – celoroční provoz	[kg.h ⁻¹]
$\dot{m}_{NaHCO_3}^{R,45}$	Množství NaHCO ₃ pro odsíření SO ₂	[kg.hod ⁻¹]
$\dot{m}_{NaSO_3}^{1500,100}$	Množství produktu odsíření – omezený provoz 100 t/h	[kg.h ⁻¹]
$\dot{m}_{NaSO_3}^{1500,45}$	Množství produktu z odsíření při celoročním provozu	[kg.hod ⁻¹]
$\dot{m}_{NaSO_3}^{R,100}$	Množství produktu odsíření – celoroční provoz, 100 t/h	[kg.h ⁻¹]
$\dot{m}_{NaHCO_3}^{1500,100}$	Množství NaHCO ₃ pro odsíření – omezený provoz	[kg.hod ⁻¹]
$\dot{m}_{NaHCO_3}^{R,100}$	Množství NaHCO ₃ pro odsíření – celoroční provoz	[kg.hod ⁻¹]
\dot{m}_{Svst}	Tok síry do kotle	[kg.h ⁻¹]
\dot{m}_{NaSO_3}	Množství produktu odsíření	[kg.h ⁻¹]
n	Otáčky šneku	[-]
s	Stoupání šroubovice	[m]
x_{Ar}	Procentuální zastoupení složky	[%]
x_{CO_2}	Procentuální zastoupení složky	[%]
x_{H_2O}	Procentuální zastoupení složky	[%]
x_{N_2}	Procentuální zastoupení složky	[%]
x_{SO_2}	Procentuální zastoupení složky	[%]
α_{NaHCO_3}	Přebytek dávkování NaHCO ₃	[-]
Δp^i	Tlaková ztráta třením	[Pa]
Δp_m^i	Tlaková ztráta místní	[Pa]
Δp_{split}	Tlaková ztráta pro Splitter	[Pa]
Δp	Celková tlaková ztráta v potrubí	[Pa]
μ_{k100}	Účinnost kotle při výkonu 100 t/h	[%]
μ_{k45}	Účinnost kotle při výkonu 45 t/h	[%]
ν	Kinematická viskozita	[m ² .s ⁻¹]
ξ	Součinitel místní tlakové ztráty	[-]

ρ_{H_2O}	Hustotu vodní páry	[kg.m ³]
$\rho_{SV}^{ts,ps}$	Hustota spalin skutečné podmínky	[kg.m ³]
$\rho_{SV,min}$	Hustota spalin	[kg.m ³]
$\rho_{VV}^{ts,ps}$	Hustotu vodní páry skut. podmínky	[kg.m ³]
ρ_{VV}	Hustota vzduchu	[kg.m ³]
χ_v	Součinitel podílu vodní páry	[-]
ψ	Součinitel plnění žlabu	[-]
w	Rychlost proudění vzduchu	[m.s ⁻¹]
CaO	Oxid vápenatý	[-]
CaOH ₂	Hydroxid Vápenatý	[-]
CaSO ₄	Síran vápenatý	[-]
CaSO ₄ .H ₂ O	Energosádrovec	[-]
CaCO ₃	Uhličitan vápenatý	[-]
CaSO ₃	Siřičitan vápenatý	[-]
CaSO ₄	Síran vápenatý	[-]
CO	Oxid uhelnatý	[-]
H ₂ SO ₃	Kyselina siřičitá	[-]
H ₂ SO ₄	Kyselina sírová	[-]
H ₂ O	Voda	[-]
HCO ₃	Hydrogenuhlíčitan	[-]
2H ₂ O	Těžká voda	[-]
HCl	Chlorovodík	[-]
HF	Fluorovodík	[-]
Na ₂ CO ₃ .NaHCO ₃ .2H ₂ O	Tron	[-]
NaHCO ₃	Hydrogenuhlíčitan sodný	[-]
NO _x	Oxidy dusíku	[-]
SO ₂	Oxid siřičitý	[-]
SO ₃	Oxid sírový	[-]

1 Úvod

Teplárna Olomouc je jednou z výroben společnosti Veolia Energie ČR, a.s. Teplárna Olomouc je výrobcem tepla a elektrické energie. Kromě těchto dvou komodit poskytuje prostřednictvím turbíny TG3 i podpůrné služby pro ČEPS, zejména primární regulaci a MZ₁₅. Teplo a elektrická energie je vyráběna pomocí práškového granulačního kotle K3 (100 t/h, 6,0 MPa, 485 °C) a fluidního kotle K5 (188,5 t/h, 13,5 MPa, 535 °C). Elektrická energie je vyráběna prostřednictvím dvou parních turbín a to protitlaké odběrové turbíny s jedním regulovaným a dvěma neregulovanými odběry TG3 (41 MWe) a protitlaké turbíny TG4 (8 MWe). Teplárna Olomouc se nachází v centru města. Kromě teplárny do soustavy CZT dodává teplo i Špičková výtopna Olomouc, která se nachází ve východní části města. Na Špičkové výtopně Olomouc jsou instalovány čtyři kotle spalující ušlechtilá paliva (topné oleje a zemní plyn). Délka parní a horkovodní soustavy města je cca 100 km. Špičková výtopna Olomouc je s teplárnou spojena prostřednictvím parní sítě.

Teplárna Olomouc je zařazena do přechodného národního plánu podle zákona č.201/2012 Sb. a podle tohoto zákona nejpozději do 30.6.2016 bude muset plnit nové emisní limity.

Teplárna stojí v současné době před problematikou ekologizace svých zdrojů. Existuje celá řada variant ekologizace teplárny. Z pohledu platné legislativy musí teplárna ekologizovat své kotle do 30.6.20120 a Špičková výtopna Olomouc s ohledem na výjimku na CZT až v pozdějších letech.

Z pohledu současně platné legislativy se naskýtají dvě varianty jak ekologizovat kotel K3. Jednou z variant ekologizace je instalace primárních opatření III. generace, instalace technologie SNCR a odsíření pomocí polosuché metody odsíření. Další variantou s ohledem na špičkový charakter provozu kotle K3 (3500 provozních hodin za rok) je jeho provoz s vyššími specifickými emisními limity, ale pouze po dobu 1500 hodin za rok.

Druhá varianta představuje aplikaci suché metody odsíření pomocí sody bikarbonu, výměnu spodního patra hořáků, rekonstrukci OFA vzduchů, výstavbu nového tkaninového filtru, případně instalaci sekundárních opatření v podobě jednoduché selektivní nekatalytické redukce NO_x.

Tato diplomová práce se zabývá jednou z možných variant odsíření kotle K3, a to odsířením pomocí sody bikarbony.

Teoretická část diplomové práce je zaměřena na získání základních teoretických základů týkajících se odsiřovacích technologií, praktická část je zaměřena na procesní návrh technologie odsíření pomocí sody bikarbony. Teoretická část se rovněž zabývá aktuální legislativou.

Smyslem práce je návrh jedné z možných technologií odsíření práškového granulačního kotle. Diplomová práce sleduje níže uvedené cíle:

- získání základního legislativního přehledu upravujícího provoz stacionárních zdrojů
- získání základního přehledu o používaných technologiích odsíření
- získání schopností práce s dostupnou odbornou literaturou potřebnou při návrhu technologických celků
- návrh technologie dávkování sody bikarbony do kotle

2 Legislativa v oblasti ochrany ovzduší

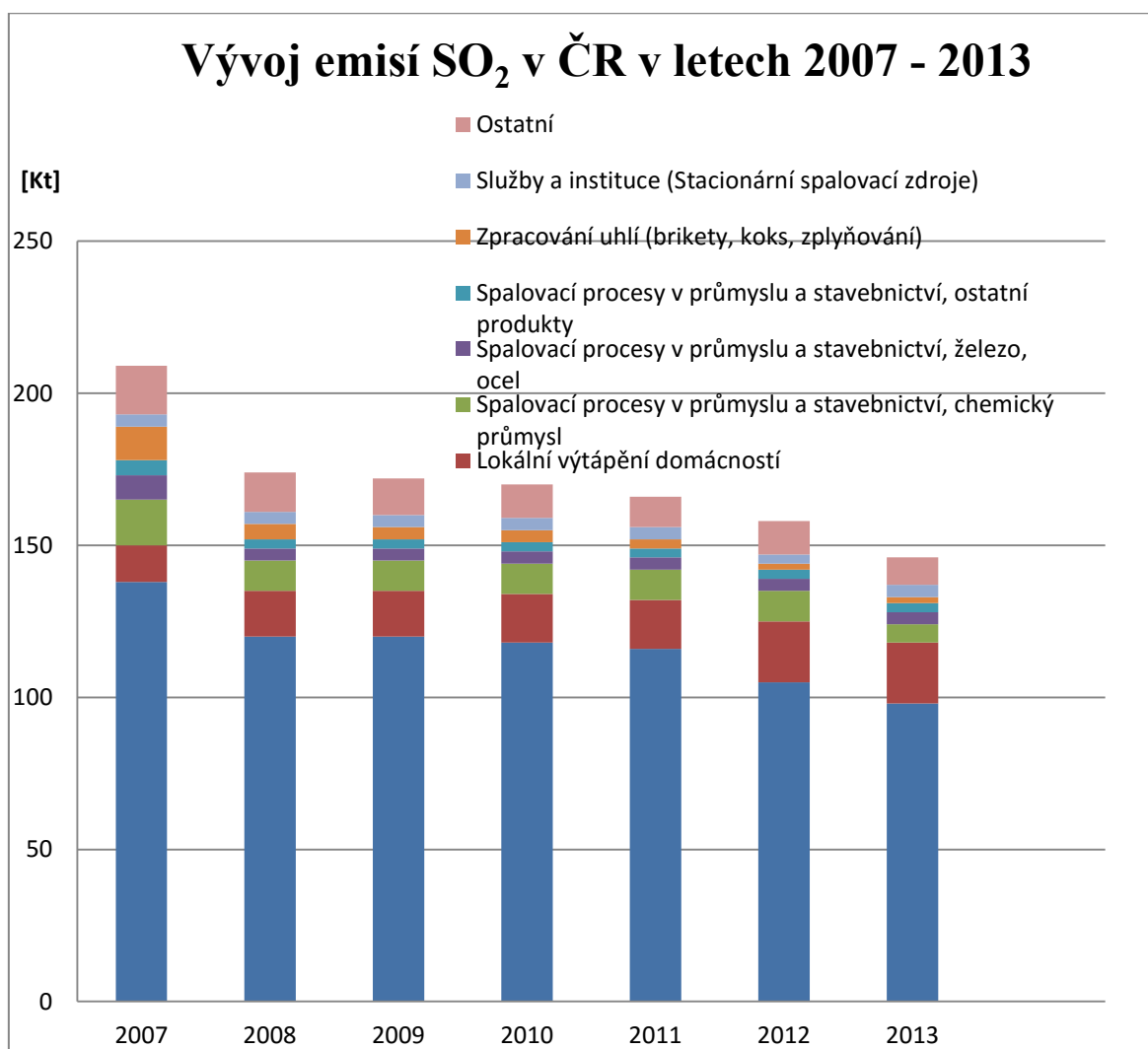
Ochranu ovzduší řeší zákon 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší. Tento zákon v souvislosti se stacionárními zdroji znečištění definuje přípustné úrovně znečištění neboli emisní limity, způsob posuzování přípustné úrovně znečištění a znečišťování ovzduší a jejich vyhodnocení a nástroje ke snižování znečištění a znečišťování ovzduší. Zákon č. 201/2012 Sb. odkazuje mimo jiné na dokumenty vydané Ministerstvem životního prostředí, mezi které patří přechodný národní plán.

Dle zákona 201/2012 Sb., §1 se ochranou ovzduší rozumí předcházení znečišťování ovzduší a snižování úrovně znečišťování tak, aby byla omezena rizika pro lidské zdraví způsobena znečištěním ovzduší, snížení zátěže životního prostředí látkami vnášenými do ovzduší a vytvoření předpokladů pro regeneraci složek životního prostředí postižených v důsledku znečištění ovzduší. (1, §1 odst.1)

Zákon č. 201/2012 Sb. stanovuje kromě látek znečišťujících ovzduší, ze kterých jsou nejčastěji zmiňovány SO₂, NO_x, CO a TZL také zdroje znečišťujících látek. Registr emisí a zdrojů znečištění ovzduší (REZZO) tyto zdroje znečišťujících látek eviduje v souladu se zákonem č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší a dělí je do čtyř skupin. Skupina REZZO 1-3 se zabývá stacionárními zdroji znečištění podle významu a velikosti a skupina REZZO 4 mobilními zdroji znečištění, které v celorepublikovém měřítku představují značnou část zdrojů znečištění.

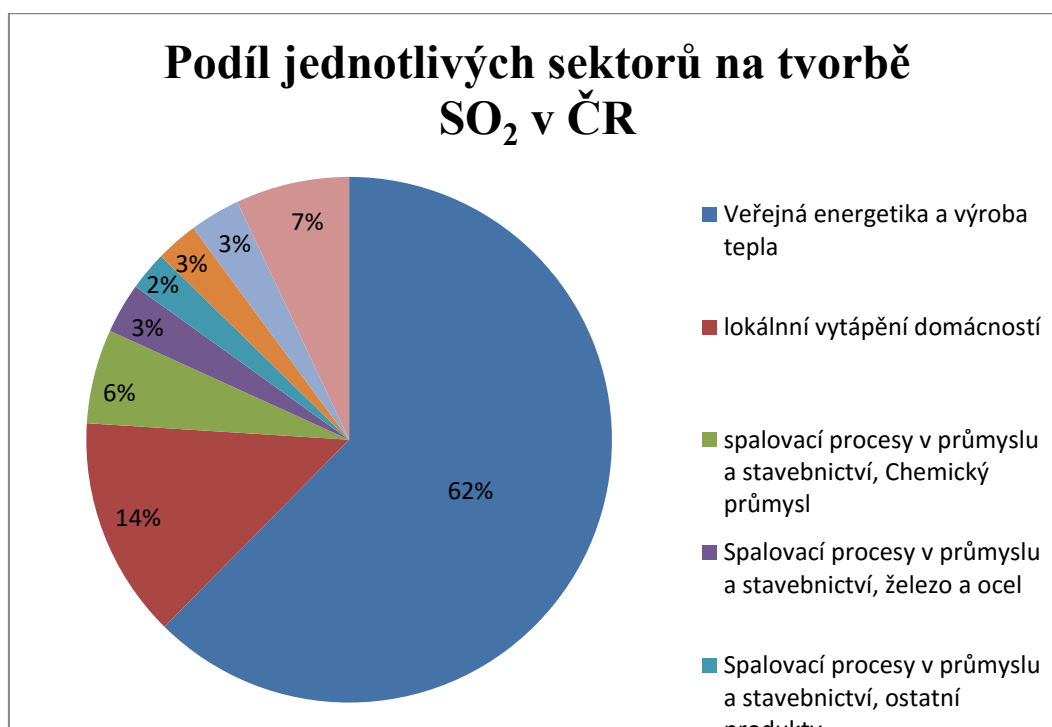
REZZO 1 - velké stacionární zdroje znečištění. Jedná se o zařízení ke spalování paliv o tepelném výkonu vyšším než 5 MW a zařízení zvláště závažných technologických procesů, např. velké elektrárny, spalovny a další bodové zdroje. Tyto zařízení se sledují jednotlivě. Provozovatelé těchto zdrojů jsou povinni aktualizovat databázi každoročním odevzdáním formulářů, dle vyhlášky 356/2002 Sb. Česká inspekce životního prostředí provádí kontroly těchto údajů. (1)

O tom, že legislativní regulace přispívá ke snižování emisí, se můžeme přesvědčit z grafu 2.1, který zobrazuje postupný vývoj emisí v letech od 2007 do 2013. Je patrné, že trend snižování emisí má klesající charakter.



graf 2.1 Vývoj emisí SO₂ v letech 2007 – 2013

Podle dat ČHMÚ je největším zastupitelem znečištění ovzduší SO₂ právě veřejná energetika a výroba tepla. Z následujícího grafu můžeme odečíst, že právě tento sektor se v ČR podílí 62 % na celkové tvorbě SO₂. Nové emisní limity stacionárních spalovacích zdrojů mají tedy své opodstatněné místo v roli ochrany ovzduší.



graf 2.2 Podíl jednotlivých sektorů na tvorbě SO₂

V tabulce 2.1 je uveden přehled emisních limitů pro kotel K3 (72,1 MW_t). První sloupec vyjadřuje stávající emisní limity platné z IPPC, ve druhém sloupci jsou uvedeny specifické emisní limity, které by pro kotel platily, pokud by byl provozován do 1500 hodin za rok, a v posledním sloupci jsou uvedeny emisní limity pokud by kotel byl provozován celoročně paralelně s kotlem K5 o čistém výkonu 141,3 MW_t.

[mg/m ³]	Stávající emisní limit (celoroční provoz)	Specifický emisní limit (1500 hod/rok)	Nový emisní limit (celoroční provoz)
SO ₂	1700	800	200
NO _x	650	450	200
TZL	75	50	25

Tab. 2.1: Přehled emisních limitů vztahujících se na provoz kotle K3

2.1 Národní program snižování emisí České Republiky

Teplárna Olomouc je zařazena do Národního programu snižování emisí. Národní program snižování emisí je dokument připraven na základě §8 zákona č. 201/2012 Sb. zákona o ochraně ovzduší. Program je zhotovený pro zhodnocení současného systému, zda je dostatečný k dosažení a udržení kvality venkovského ovzduší na vyhovující úrovni. Návrh programu čistého ovzduší pro Evropu vychází ze zjištění, že i přes výrazné zlepšení,

kterého bylo v uplynulém období dosaženo, je kvalita ovzduší na mnoha místech Evropy nedostatečná a v oblasti energetické politiky stanovuje následující cíle:

- dosažení 20 % snížení energetické náročnosti do roku 2020
- relevantním cílem je dosažení 20 % podílu obnovitelných zdrojů energie

Aktualizace Státní energetické koncepce ČR si klade několik strategických cílů. Jeden z nich myslí na udržitelnosti energetiky z hlediska dopadů na životní prostředí. Mezi dalších pět strategických priorit je zahrnut:

- vyvážený energetický mix zdrojů
- zvyšování energetické účinnosti
- dosažení úspor energie v hospodářství a domácnostech
- snížení podílu pevných paliv do roku 2040
- k roku 2020 zvýšit energetické úspory

Pro největší zdroje znečišťujících látek koncepce předpokládá následující vývoj:

- podíl černého a hnědého uhlí v primárních zdrojích klesne z 40,9 % v roce 2010 na 33,6 % v roce 2020
- spotřeba hnědého uhlí v domácnostech klesne z 21,1 PJ v roce 2010 na 9,2 PJ v roce 2020
- spotřeba zemního plynu v dopravě stoupne z 3,1 PJ v roce 2010 na 26,8 PJ v roce 2020

2.2 Přechodný národní plán

Přechodný národní plán byl zpracován na základě §37 zákona č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší. Vztahuje se na stacionární zdroje o celkovém tepelném příkonu vyšším jak 50 [MW_t] a udává emisní stropy v jednotlivých letech přechodného období, pravidla PNP nebo způsob monitorování PNP

Cílem Přechodného národního plánu je prostřednictvím postupného snižování celkových ročních emisí tuhých znečišťujících látek, oxidu siřičitého a oxidů dusíku ze spalovacích stacionárních zdrojů zahrnutých do přechodného národního plánu, dosáhnout připravenosti na plnění emisních limitů stanovených s účinností od 1.1.2016 ve vyhlášce č. 415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší, a to nejpozději k 1.7.2020.

Česká Republika se rozhodla pro využití přechodného národního plánu, neboť by u dotčených spalovacích stacionárních zdrojů z časových důvodů nebylo možné zrealizovat investice nezbytné k zajištění plnění nových emisních limitů od 1.1.2016.

Ověření správnosti měření kontinuálního měření emisí zajišťuje provozovatel jednorázovým měřením emisí provedeným autorizovanou osobou podle §32 odst. 1a) zákona o ochraně ovzduší jednou za kalendářní rok. Každé tři kalendářní roky má provozovatel povinnost zajistit kalibraci kontinuálního měření emisí. (2)

V případě Teplárny Olomouc dokument stanovuje jak emisní stropy pro jednotlivé etapy, tak i předpokládaná opatření pro zajištění plnění emisních limitů. Předpokládaná opatření jsou v podobě realizace primárních a sekundárních opatření tvorby NO_x, výstavby odsíření a tkaninových filtrů. Hodnoty emisních stropů v [t/rok] jsou uvedeny v následující tabulce. Zdroj (2 stránky 17, příloha 2)

Emise [t/rok]	2016	2017	2018	2019	2020
SO ₂	2007,52	1795,06	1110,01	424,95	212,48
NO _x	831,2	799,84	572,6	345,36	172,68
TZL	138,53	128,29	85,39	42,5	21,25

graf 2.3 Emisní stropy TOL v jednotlivých etapách Národního přechodného plánu

3 Snížení emisí SO₂

3.1 Oxidy síry a jejich vliv na životní prostředí

Vliv oxidů síry na životní prostředí považujeme za velmi negativní. Oxidy síry a oxidy dusíku rozptýlené do ovzduší tvoří ve sloučení s vodou tzv. kyselé deště, které jsou tvořeny syrnými a dusíkatými kyselinami. *Zvýšená kyselost v půdě a vodních tocích se nepříznivě projevuje na rybách a rostlinstvu. Kyselý déšť také urychluje zvětrávání uhličitanových materiálů* (3). U osob vystavených vyšším koncentracím SO₂ se nejčastěji projevují bolesti hlavy, dráždění očí a porušení dýchacích orgánů. Omezení emisí SO₂ je tedy pro člověka a životní prostředí žádoucí.

3.2 Síra v palivu

Síra v palivu je obsažena jak v hořlavině, tak v popelu. Poměr obsahu síry v palivu je dán geologickým stářím, kterým je dáno prouhelnatěním jeho organické hmoty. Organická hmota se skládá z pěti prvků C, H, O, N, S. Rozhodující vliv na spalovací proces mají prvky C, H, O. Prvky N a S mají vliv především na tvorbu emisí NO_x a SO₂. Veškerá spalitelná síra shoří na SO₂, vedení spalovacího procesu nemá na tvorbu emisí oxidu siřičitého vliv.

Síru v palivu najdeme v těchto čtyřech formách:

- piritická
- siřičitá
- organická
- síranová

Jako spalitelné složky síry můžeme označit první tři prvky, které ve velké míře shoří na SO₂. Pouze množství pohybující se mezi 3 – 5 % shoří na oxid siřičitý SO₃. Při spalování uhlí v tuhých zbytcích zůstává síra síranová, která se během procesu oxidace přemění na CaSO₄ (sádrovec).

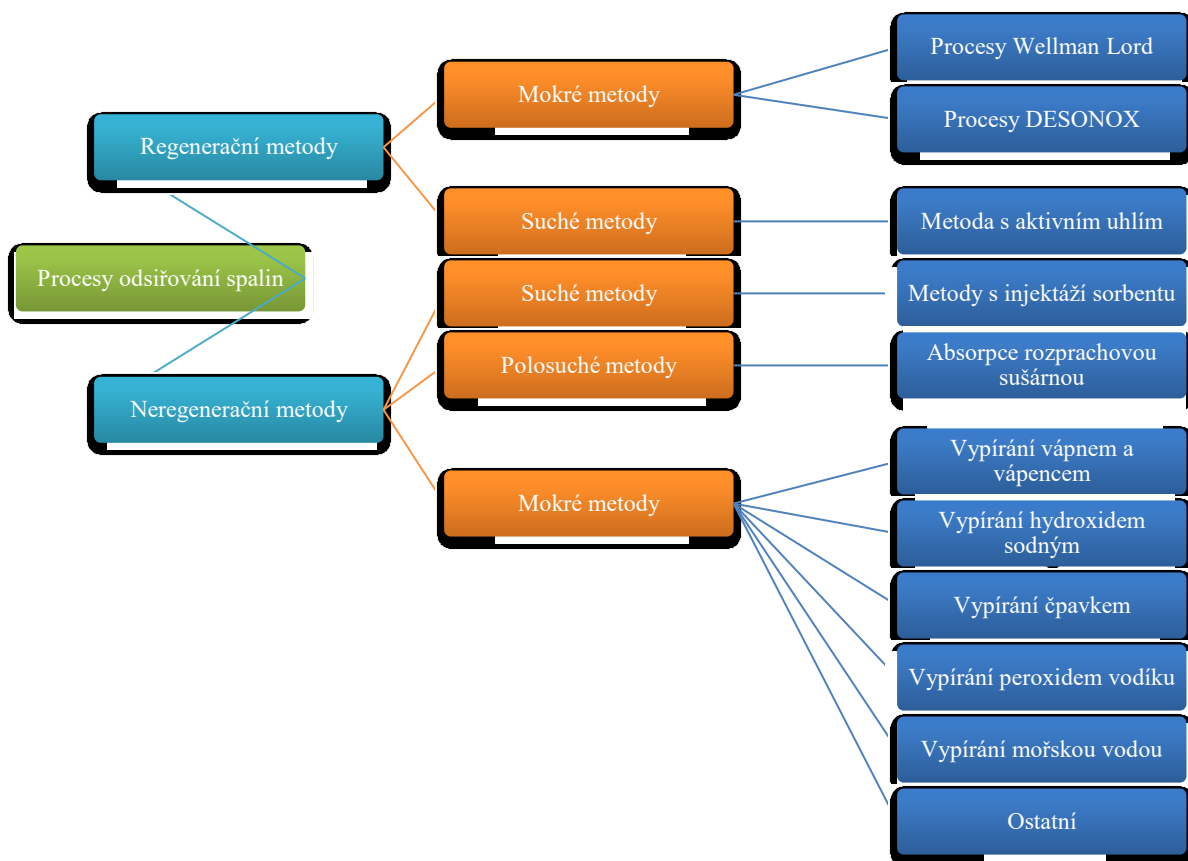
Síra je v palivu nežádoucí jak z pohledu vypouštěných emisí, tak z pohledu technického zařízení kotle. Obsah síry v uhlí ovlivňuje chemické reakce a významně se tak podílí na dvou nejzávažnějších provozních problémech. Jedná se především o tvorbu a působení struskových a popílkových nánosů a o vznik a působení koroze na straně palin.

3.3 Metody snižování emisí SO₂

Jak již vyplynulo, vznik emisí SO₂ je vázán pouze na obsahu síry v palivu, řízením spalovacího procesu nemůžeme nijak ovlivnit množství produkce SO₂. V zásadě tedy produkci SO₂ ovlivňují pouze dva způsoby. Jedna z nich spočívá v úpravě uhlí před spalováním, při níž je uhlí zbaveno části spalitelné síry, druhá pak v odstranění již vzniklých oxidů síry ze spalin. Metody odbourávání síry z paliva jsou z hlediska technologie procesu prozkoumané, bohužel jejich účinnost, delší doba procesu a nároky na množství aktivních látek z nich dělají nepoužitelné metody pro průmyslovou výrobu.

Pro omezení emisí SO₂ jsou mnohem rozšířenější metody odsiřování spalin. Téměř všechny se zařazují až na konec spalovacího procesu, který proto v podstatě neovlivňují. Lze je použít u již existujících i u nově zbudovaných zdrojů. Významnou výhodou je skutečnost, že většina těchto technologií je poměrně málo závislá na vlastnostech spalovaného paliva. Podle způsobu zachycování oxidu siřičitého na absorbent je možné rozdělit technologie na regenerační a neregenerační. Při regeneračních procesech se aktivní látka po reakci s oxidem siřičitým regeneruje a vrací se zpět. Výsledkem je menší spotřeba absorbentu a zisk síry v použitelné formě jako produktu regeneračního procesu. Nevýhodou je větší technologická složitost, vyšší provozní i investiční náklady a nutnost přizpůsobit výkon elektrárny požadavkům odsiřovacího zařízení. Při neregeneračních reaguje aktivní látka oxidem siřičitým za vzniku buď využitelného produktu nebo odpadu. Jejich výhodou je jednodušší technologie a nižší investiční i provozní náklady. Nevýhodou je velká spotřeba reagentu a velké množství produktu nebo odpadu, který je nutno likvidovat.

Pro odsíření existuje celá řada metod. Jejich výčet je patrný na obr. 3.1., metody se dělí na regenerační a neregenerační. V podmínkách tepláren a elektráren ČR se nejvíce používají suché, polosuché a mokré metody odsíření bez regenerace. Principy jednotlivých metod jsou blíže popsány v kapitole 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3, 3.3.4.



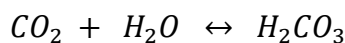
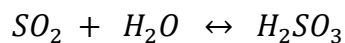
Obr. 3.1 Metody odsiřování spalín 3.3.1 Mokrý vápencový vypírka

3.3.1 Mokrý vápencový vypírka

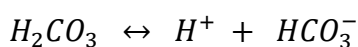
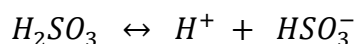
Podstatou této technologie je vypírání SO_2 a dalších kyselých složek (HCl , HF) ze spalín vápencovou suspenzí a jejich následná neutralizace a tvorba konečného produktu (sádrovce) oxidací a krystalizací.

Během procesu probíhají následující rovnovážné děje:

- Rozpouštění SO_2 a CO_2 ve vodě a tvorba kyselin



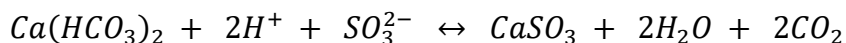
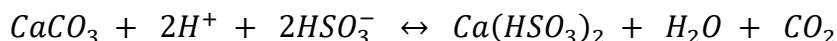
- Disociace Kyseliny siřičité a uhličitě



Při disociaci (rozštěpení) se uvolňují ionty vodíku, způsobují snížení hodnoty pH. S klesající hodnotou pH klesá také absorpční schopnost prací suspenze. Odstranění iontu

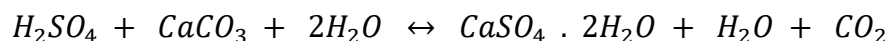
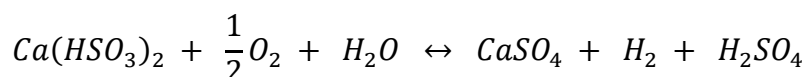
vodíku docílíme neutralizací.

- Neutralizace



Rychlost reakce pohlcování SO_2 a tvorby siřičitanu vápenatého závisí na velikosti reakčního povrchu mezi spaliny a absorpčním roztokem, také na koncentraci a rozpustnosti vápence. Rychlost rozpouštění vápence je funkcí koncentrace vodíkových iontů a klesá při poklesu pH. Příznivý průběh absorpčního procesu je spjatý s optimální hodnotou pH, která se pohybuje mezi hodnotami 5 a 6. Negativní vliv na rychlost štěpení vápence mají ionty vápníku, chloridů a siřičitanů, zejména při hodnotách pH vyšších než 5.

- Oxidace



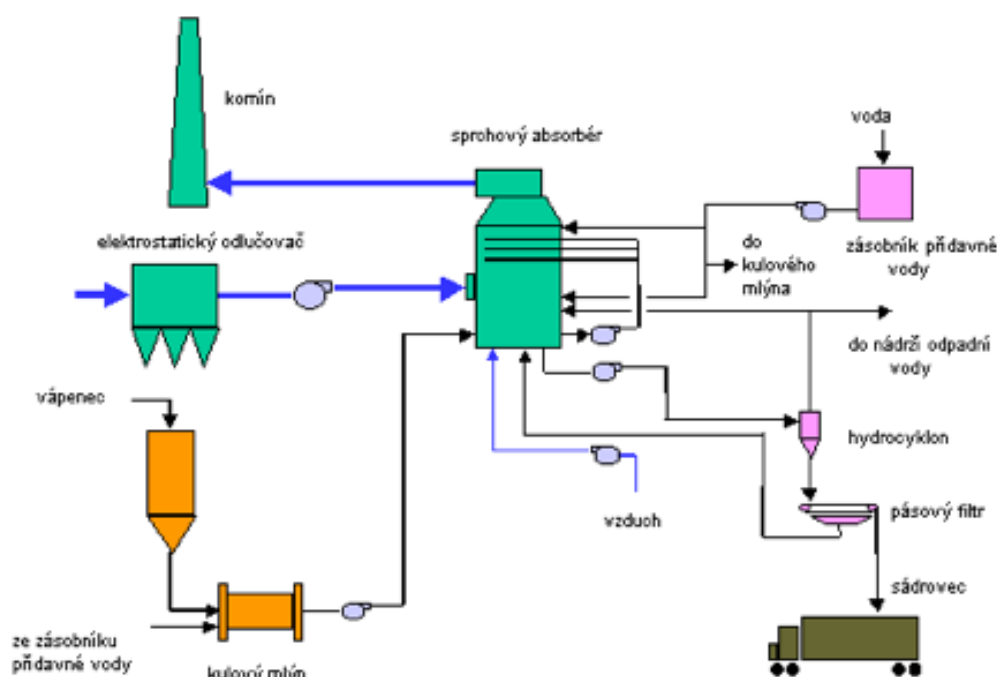
Konečný produkt procesu (sádrovec) vzniká v oxidační zóně prostoru absorbéru oxidací hydrogensířičitanu vápenatého. Potřebný kyslík se do oxidační zóny dopravuje vháněním vzduchu. Kyselina sírová reaguje s přebytečným vápencem na sádrovec a kyselinu uhličitou.

- Krystalizace

krystalizační zóna je v kalovém absorbéru pod oxidační zónou. V této zóně narůstají jemné krystalky sádrovce na větší, snadno odfiltrovatelné. Optimální průběh krystalizace nastává, pokud se hodnota koncentrace sádrovce v prací suspenzi pohybuje okolo 100 g/l. Aby prací suspenze byla schopna další absorpce, přidává se do krystalizační zóny vápenec. Díky krystalizaci se získává sádrovec čistý, schopný dalšího průmyslového využití. Všechny uvedené reakce se obvykle uskutečňují v jediném reakčním prostoru absorbéru, který je rozdělen na absorpční, oxidační a krystalizační zónu. Ve spodní části absorbéru je jímka pro absorpční roztok, ve které probíhá oxidace a krystalizace. Nejspodnější krystalizační zóna je obvykle promíchávána míchadly. V horní části absorbéru, ze které vystupují vyčištěné spaliny, je umístěn odlučovač stržených kapiček ve spalinách pod 50 mg/m³, a to zejména v aplikacích, kde vyčištěné spaliny vstupují do ventilátoru nebo regenerativního ohříváku a kde vlhkost ve spalinách může podporovat korozi.

Toto je stručné nastínění procesu mokrého odsíření SO_2 ze spalin vápno-vápencovou metodou. Další využívané procesy vypírání SO_2 naleznete v seznamu níže. Ovšem v zásadě jde o stejný technologický postup, pouze s jiným reakčním činidlem.

- metodu vypírání mořskou vodou
- mokrou magnetizovanou metodu
- mokrou čpavkovou metodu

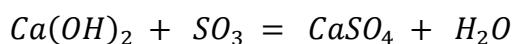
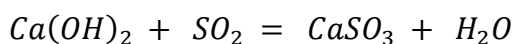


Obr. 3.2 Schéma technologického procesu odsířování mokrou vápno/vápencovou metodou. [2]

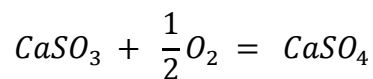
3.3.2 Polosuchá vápencová vypírka

Tato metoda odsíření spočívá v principu rozprášení vodní suspenze sorbentu do proudu spalin. Sloučením sorbentu se spalinami dochází k reakci vodní suspenze s kyselými složkami spalin (SO_2 , SO_3 , HCl , HF).

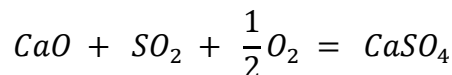
První fázi reakce vodní suspenze s kyselými složkami spalin dochází k absorpci a vzniká siřičitan vápenatý CaSO_3 nebo síran vápenatý CaSO_4 sloučený s vodou.



Následuje oxidace spojená s odpařením vody. Proces odpaření vyžaduje časovou prodlevu cca 10 vteřin. Výsledným produktem je tedy suchý prach, který lze zachytit v elektrostatickém odlučovači nebo tkaninovém filtru.

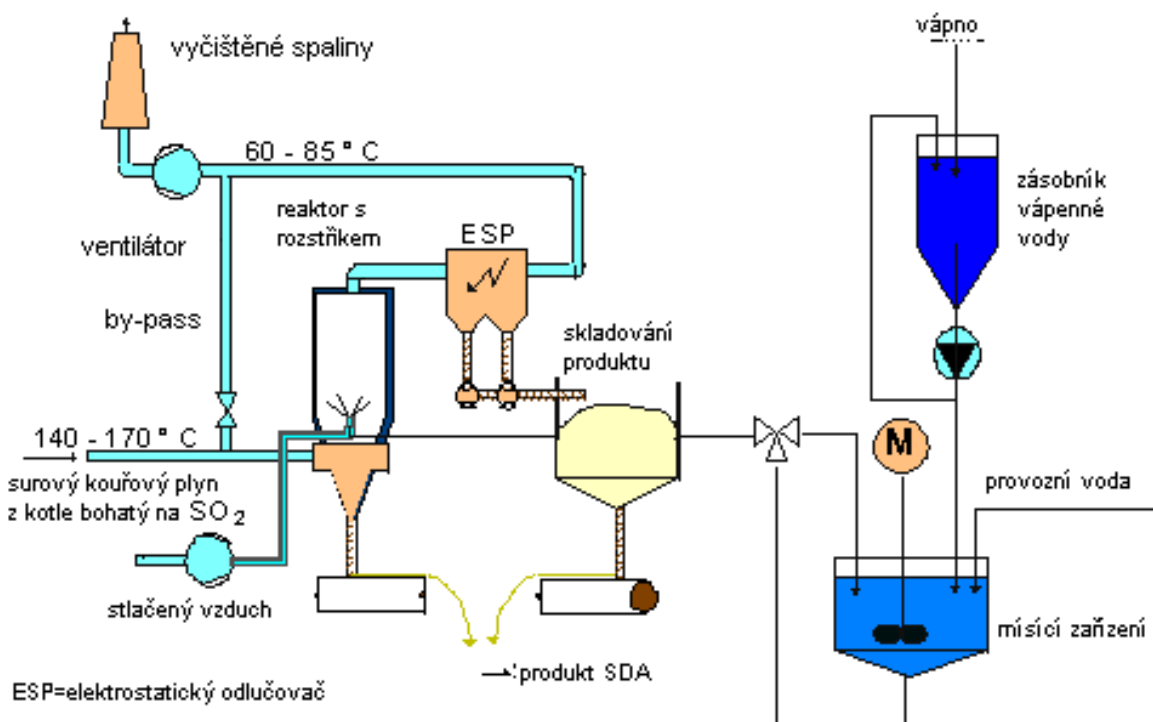


Výsledná rovnice



Princip odsíření na obr 3.3 je s tzv. předřazeným rozstřikovačem. Běžně se používá i provedení s rozstřikovačem suspenze umístěným za odlučovačem tuhých částic spalín, kterým může být běžný elektrostatický odlučovač. Kromě odloučení většiny popílku ještě před vstupem do reaktoru má toto provedení i další výhody, které mohou napomoci bilanci počátečních investic:

- při dané účinnosti může snižovat spotřebu vápna
- umožňuje růst provozní teploty rozprašovače
- pomáhá dosáhnout větší účinnosti elektrostatických odlučovačů a s tím spojené nižší emise
- snižuje objem odpadu ke zneškodňování



Obr. 3.3 Technologické schéma polosuché metody odsíření. [2]

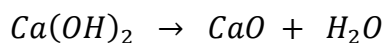
Nevýhodou polosuché metody je závislost účinnosti na teplotě ochlazených spalín. Čím více se teplota spalín v absorbéru přiblíží rosnému bodu, tím větší je účinnost odsíření. Bohužel ochlazení spalín na teplotu blízkou rosnému bodu není žádoucí kvůli kondenzaci spalín.

3.3.3 Suchá vápencová metoda

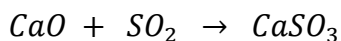
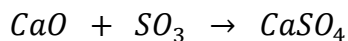
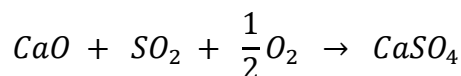
Pro odsíření spalín suchou cestou se nejčastěji používají dvě základní metody: Odsířování spalín jemně mletým vápencem dávkováním do spalovacího prostoru kotle a odsířování spalín ve fluidní vrstvě. Běžně používané sorbenty pro tuto aplikaci mohou být: práškový vápenec (CaCO_3), vápenný hydrát (Ca(OH)_2) nebo nehašené vápno (CaO).

Pro maximální zisk z prvně jmenované reakce založené na principu souprouté reakce CaO a SO_2 je nutná dodávka jemně mletého vápence (až 100 % pod 60 mikronů), i tak se ale udává účinnost pouze okolo 60 %.

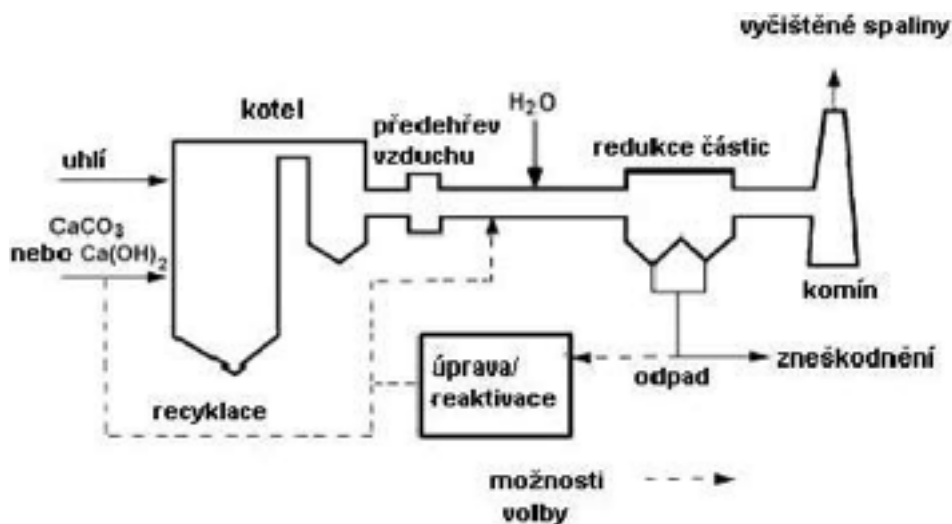
Při dávkování činidel do topeniště nejprve probíhá endotermní reakce dehydratace nebo dekarbonizace, podle použité látky.



V další fázi probíhají exotermické heterogenní reakce (plyn/tuhá látka), při kterých nastává odsíření, případně vazba dalších škodlivých látek.



Jak již bylo zmíněno, během první reakce dochází za zvýšené teploty k dekarbonizaci (dehydrataci) a tím doprovázený vznik reaktivních částí CaO . Povrch těchto částic reaguje s SO_2 ze spalín a vzniká siřičitan vápenatý (CaSO_3) a síran vápenatý (CaSO_4). Produkty těchto reakcí se následně zachycují s popílkem v elektrostatickém odlučovači nebo tkaninovém filtru. Teplotní okno pro dávkování vápence do spalovacího prostoru je v rozmezí 980-1230 °C. Při dodržení teplotního okna a setrvání na teplotě alespoň 1/2 vteřiny je produktem reakce pouze pálené vápno CaO . Pro aplikaci vápenného hydrátu platí dvě teplotní okna, a to v rozmezí 980 – 1230 °C a okolo 540 °C.



Obr. 3.4 Dávkování sorbentu do topeniště [2]

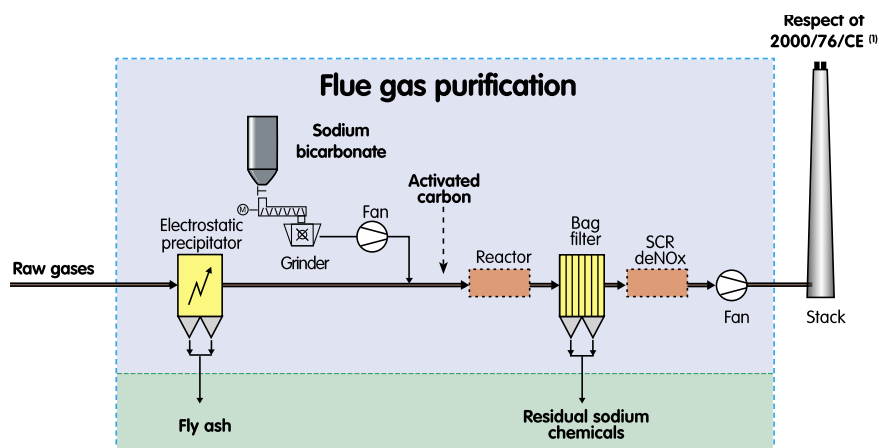
Při nízkých investičních nákladech lze zvýšit účinnost odsíření až o 10% zavedením rozstříku vody do spalínového traktu před odlučovač tuhých částic. Aplikace je již schematicky znázorněna na obr 3.4. Další alternativou zvyšování účinnosti odsíření je recyklace reakčního produktu. Reakční produkt zachycený v odlučovači tuhých částic se opakovaně vstříkuje do spalovacího prostoru nebo do spalínového traktu. Toto opatření slibuje zvýšení využití nezreagovaného CaO a zvýšení účinnosti odstranění emisí SO₂ na 70 - 90 %.

Druhá metoda odsíření při spalování v cirkulujícím fluidním loži se aplikuje v rozmezí teplot 800 - 950 °C. Jednoduchost procesu vyžaduje minimální nároky na provoz a údržbu. Pro tuto aplikaci je nežádoucí velmi jemná frakce absorbentu z důvodu setrvání v prostoru ohniště. Produkt reakce je suchý a pevný odpad, který nepotřebuje další úpravu před vyvezením na skládku nebo využitím ve stavebnictví.

3.3.4 Odsíření pomocí sody bikarbyny

Další suchou metodou odsíření je odsíření pomocí bikarbyny. V zásadě jde o injektáž sorbentu na bázi sodíku do spalin před nebo za elektrostatický odlučovač. Schéma aplikace je na obr. 3.3

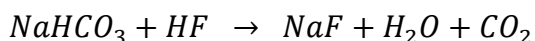
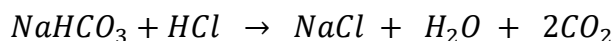
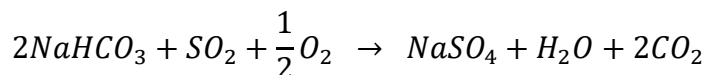
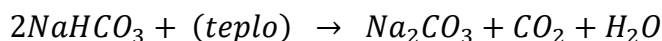
Soda bikarbóna je bílý krystalický prášek se zásaditým pH. Vyrábí se z uhličitanu sodného Na₂CO₃ rozpuštěného ve vodě za doprovodu oxidu uhličitého CO₂. CO₂ ve vodě probublává a slučuje krystalky hydrogenuhličitanu sodného NaHCO₃. Větší krystalky se odstředí a následně suší.



Obr. 3.5 Aplikace sody Bikarbony

V literatuře se udává, že aplikace této metody ve vazbě na prostorovou dispozici a počáteční investici v porovnání s jinými metodami není příliš náročná a lze s touto metodou dosáhnout účinnosti odsíření až 80 % při dávkování cca 1,4 x oproti stechiometrii. Nevýhoda aplikace bikarbony spočívá ve vyšší ceně sorbentu.

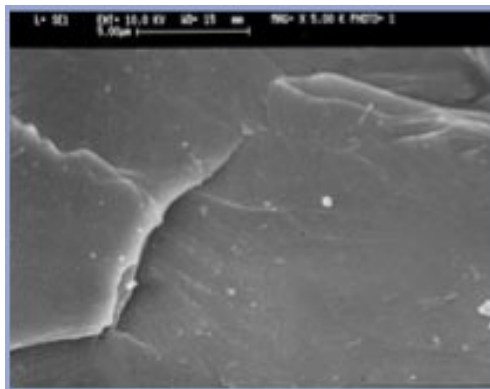
Po nadávkování sody bikarbony do spalin nejprve dochází k zahřátí směsi a následnému rozkladu sody bikarbony na uhličitan sodný Na_2CO_3 , oxid uhličitý CO_2 a vodu. Následuje sloučení sody bikarbony dle následujících chemických reakcí s některými kyselými složkami spalin jako jsou kyselina chlorovodíková HCl , fluorovodík HF nebo oxid siřičitý.



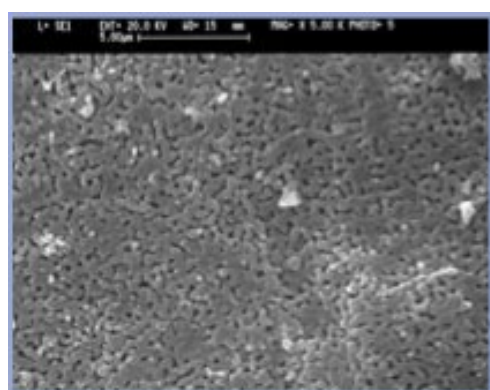
Při kontaktu sodné substance se hydrogenuhličitan sodný tepelně rozkládá na uhličitan sodný. Vnější povrch sorbentu uhličitanu sodného je velmi porézní a má větší měrný povrch. Uhličitan sodný reaguje s oxidem siřičitým na siřičitan (síran) sodný. Následně se reakce zpomaluje z důvodu zaslepení pórů sorbentu. Aby mohla reakce pokračovat, musí se částice sorbentu dále rozkládat. Tento rozklad uvolňuje do okolní atmosféry vodu, plyny CO_2 a vytváří v částici síť volného prostoru. Tímto procesem se odhalí čerstvý reagenční sorbent a umožní SO_2 opět difundovat dovnitř částic. Takové zvětšení povrchové plochy dosahuje v závislosti na určitém specifickém sorbentu řádově 5-20-ti násobku oproti původní velikosti. (4 str. 93)

Na obr. 3.4 můžeme vidět hladký povrch jemně mletého hydrogen uhličitanu sodného před

tepelnou aktivací. Na obr. 6 lze vidět porézní povrch uhličitanu sodného.



Obr. 3.6 Hydrogen uhličitan sodný před tepelnou aktivací



Obr. 3.7 Uhličitan sodný - porézní povrch

Hydrogenuhličitan sodný neutralizuje kyseliny (kyselina chlorovodíková, oxid siřičitý nebo fluorovodík) s velmi vysokou účinností. Přidáním aktivního uhlí nebo koksu do hydrogenuhličitanu sodného lze ze spalin odstranit i těžké kovy a dioxiny

Maximální využití reakčního činidla s SO_2 probíhá v rozmezí teplot 140 až 300 °C s výdrží na teplotě minimálně 1 sekundu. Z tohoto důvodu je ideální místo pro vstřik sorbentu ve spalínovém traktu v blízkosti vyústění z druhého tahu kotle. Toto řešení je ohleduplnější vůči požadavkům na materiál trysek, což snižuje náklady technologie a prodlužuje jejich životnost. V případě, kdy není možné dodržet dobu reakce min. 1 sekundu, je proces vybaven kontaktním reaktorem, jako je tomu na obr. 3.3.

I když je injektáž sorbentu do kouřovodu navenek jednoduchý pochod, obsahuje několik klíčových jevů, jež zvyšují jeho redukční působení a to:

- a) *Odsiřování spalin sorbenty na bázi sodíku nebo vápníku se produkty s vysokým podílem nezreagovaného absorpčního činidla mohou několikrát recyklovat.*
- b) *Spojení se stávajícími elektrostatickými odlučovači zvyšuje účinnost při snížení teploty i za vyšší vlhkosti. (4 str. 92)*

Kritickým místem technologie odsířování pomocí hydrogenuhličitanu sodného jsou popílký a změna jejich pucolánových vlastností (pucolán = pojivo do malt a betonů) z hlediska jejich dalšího využití jako přísad při výrobě stavebních hmot nebo jiných certifikovaných výrobků používaných ve stavebnictví.

Využití produktu odsíření ve stavebním průmyslu je tedy omezeno kvůli negativnímu vlivu na cementy a betony, respektive na jejich výsledné napěťové charakteristiky. Vzniklý produkt lze částečně využít pro přípravu směsí ukládaných do dolů.

3.3.5 Použitelnost jednotlivých metod

V podmínkách teplárenství mají v kontextu stávající legislativy smysl zejména polosuché a suché metody odsíření, i když pokud se podíváme na projekt mokrého odsíření malého teplárenského zdroje v Plané nad Lužnicí, nemusí tento výrok platit absolutně.

V následujících tabulkách 3.1, 3.2, 3.3 je uvedeno srovnání, které je převzato ze zdroje [5].

Suché metody se vyznačují jednoduchým technologickým a konstrukčním provedením. S těmito výhodami jdou současně i nízké investiční náklady, často bohužel na úkor vyšších provozních nákladů (dražší sorbent).

Metoda	Účinnost [%]	Výhody	Nevýhody
Dávkování sorbentu při přípravě paliva	60 – 70	Nízké investiční náklady	Nízká účinnost, vysoké provozní náklady
Injektáž sorbentu do topeniště (s recirkulací)	70 – 90	S využitím regenerace dobrá účinnost	Vysoké provozní náklady
Injektáž sorbentu do kouřovodu	75 – 80	Jednoduchost, nízké investiční náklady	Nízká účinnost
Kombinovaná injektáž sorbentu	75 – 90	Nižší spotřeba sorbentu	Vyšší investiční náklady
Suchá pračka s cirkulujícím fluidním ložem (CFB)	80 - 95	Jednoduchá konstrukce zařízení	Fluidní lože – nestabilní prvek

Tab. 3.1 Porovnání suchých metod odsíření (5)

Metoda	Účinnost [%]	Výhody	Nevýhody
Konvenční polosuché	80 – 92	Spolehlivost provozu	Vyšší provozní náklady

metody – rozprašovací sušárny			
Odsiřovací systém spalín NID	90 - 95	Nízké investiční náklady, snadná údržba díky nižšímu počtu komponentů. Kompaktní konstrukce reaktoru bez nutnosti předřazeného sběrače. Možnost použití nízkoreaktivního činidla. Vysoká účinnost. Voda, popílek a činidla se míchají mimo spaliny. Neomezený obsah síry v uhlí. Kompaktní velikost (zhruba 20 % rozprašovací sušárny)	Méně účinné než mokré pračky.

Tab. 3.2 Porovnání polosuchých metod odsíření (5)

Metoda	Účinnost [%]	Výhody	Nevýhody
Mokrá vápencová vypírka	85 – 98	Vysoká účinnost, nejrozšířenější metoda	Vysoké investiční náklady
Mokrá magnetizovaná voda	90 – 92	Produkce kyseliny sírové	Vysoké investiční náklady
Mokrá čpavková metoda	90 – 92	Možnost využití odisiřovacího produktu	Nutnost chlazení spalín až na 30°C
Metoda vypírání mořskou vodou	Až 95	Nepoužívá se žádný sorbent	Nelze použít v ČR

Tab. 3.3 Porovnání mokrých metod odsíření (5)

3.4 Produkty odsíření

Při použití mokré metody odsíření nezávisle na spalovaném palivu je produktem odsíření energosádrovec $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Pro další využití je zbaven vody. Hlavními fyzikálními vlastnostmi energosádrovce jsou zrnění, tvary krystalů a jejich znečištění v případě použití sorbentu horší kvality. Požadavky na čistotu jsou kladeny od odběratelů, kterým může nedostatečná čistota způsobit problémy při dalším zpracování. Znečištění energosádrovce může být způsobeno zbytkovým obsahem SO_2 a ve vodě rozpustnými látkami (oxid sodný, oxid horečnatý). Využití energosádrovce nalezneme při výrobě štukátérské sádry,

sádrokartonových desek, kompozitních příček, anhydritových podlahovin, sádrové pěny apod. Při výrobě cementu se používá jako regulátor doby tuhnutí cementu nebo nalezne využití při zemních pracích na zpevňovací zasypy, při rekultivaci půdy a v zemědělství ho využijeme jako hnojivo.

Výsledný produkt suchých a polosuchých metod odsíření je elektrárenský popílek, od kterého nelze oddělit sádro, siřičitan vápenatý a nespotřebovaný CaO. Využít ho lze tedy pouze s obsaženým popílkem, který může obsahovat těžké kovy, toxické a radioaktivní prvky. Zamezení šíření těchto látek lze tzv. stabilizací produktu přidáním vápna nebo záměsové vody, čímž vznikne stabilizát - tuhá látka odolná proti vyluhování toxických látek a sloučenin. Využití stabilizátu najdeme např. při stavbě vozovek, k výrobě stavebních prvků nebo lze uložit ve vytěžených důlních prostorech.

Při volbě uložení nebo dalšího využití produktů spalování a odsíření je rozhodující zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech, který stanovil povinnosti při nakládání s odpady a podmínky pro předcházení vzniku odpadů.

4 Praktická část diplomové práce

V rámci praktické části diplomové práce se zabývám návrhem odsíření práškového granulačního kotle K3 pomocí sody bikarbony.

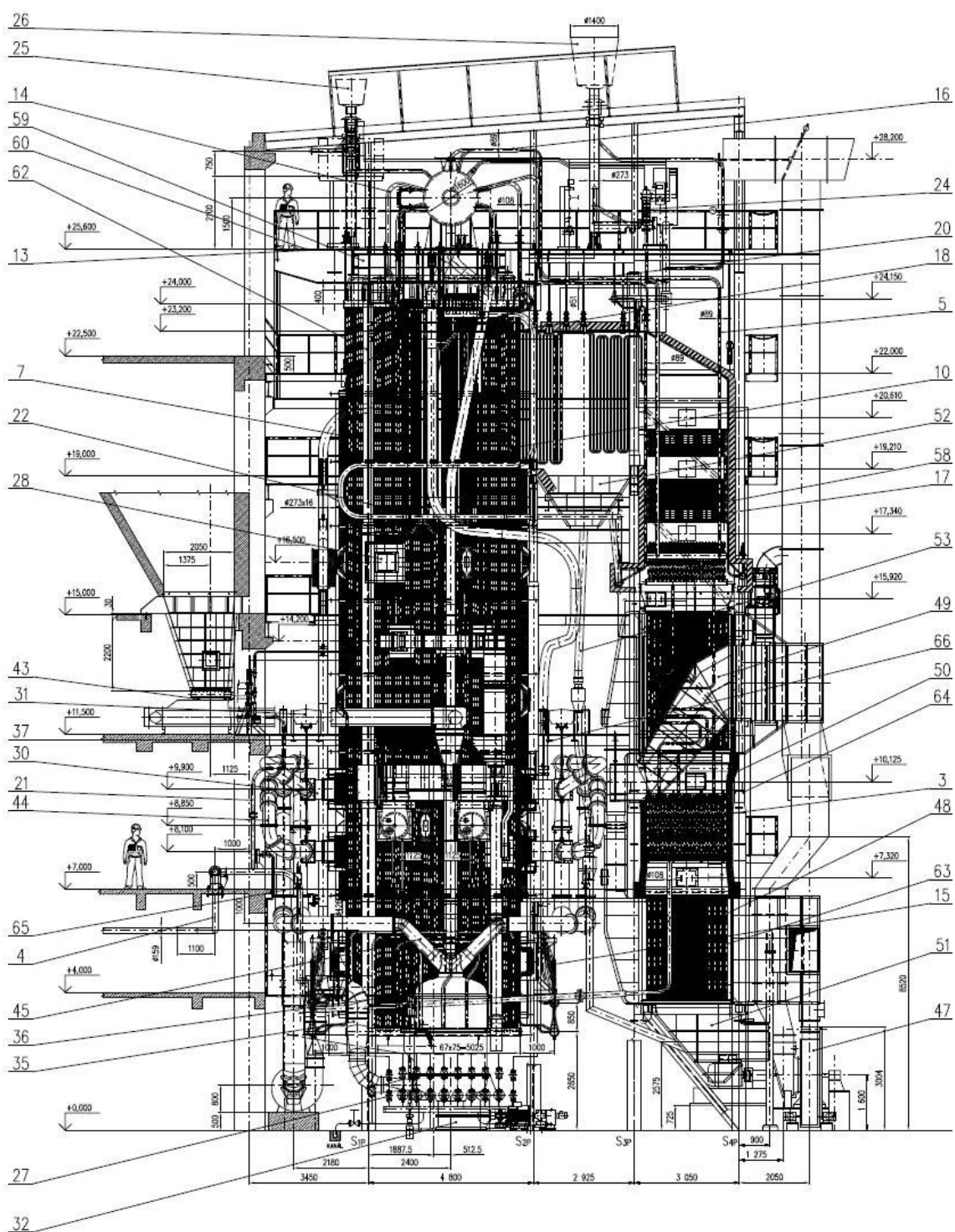
4.1 Práškový granulační kotel K3

V tabulce 4.1 jsou uvedeny základní technické parametry práškového granulačního kotle K3. Řez práškovým granulačním kotlem K3 je uveden na obr. 4.1.

Výrobce kotle	První brněnská strojírna
Zhotovitel rekonstrukce kotle	Energomontáže Liberec,
rok provedení rekonstrukce na černé uhlí	1999
Jmenovitý výkon kotle	100 t.h ⁻¹
Minimální výkon kotle bez stabilizace	45 t.h ⁻¹
Minimální výkon kotle se stabilizací	36 t.h ⁻¹
Tlak páry za kotlem	6 MPa
Teplota napájecí vody	105 – 106 °C
Teplota výstupní páry	485 ± 8 °C
Účinnost při výkonu 90 t.h ⁻¹	88,5 %

Tab. 4.1 Základní parametry kotle K3

Jedná se o práškový, granulační kotel, spalující černé uhlí. Kotel je strmotrubný, s přirozeným oběhem vody a přímým foukáním uhelného prášku. Kotel je vybaven mlýnicí se dvěma kroužkovými mlýny a přímým foukáním uhelného prášku. Kotel je konstruován jako dvoutahový se svislým ohništěm se vzestupným prouděním spalin a jedním sestupným konvekčním tahem. V ohništi se udržuje podtlak, který je vytvářen dvěma kouřovými ventilátory. Spalovací zařízení je tvořeno osmi proudovými hořáky umístěnými v rozích kotle ve dvou patrech nad sebou. Každé patro hořáků je zásobováno z jednoho mlýna.



Obr. 4.1 Řez kotlem K3

4.2 Soda bikarbona

Soda bikarbona (bikarbonát sodný, BICAR®TEC) je chemická látka s molekulovým vzorcem NaHCO_3 . Jedním z výrobců této látky je společnost SOLVAY CHEMICALS INTERNATIONAL SA. Není klasifikována podle celé řady evropských předpisů jako

nebezpečná látka. Dodává se v 98 % koncentraci. pH látka 8,4. Další parametry látky jsou v níže uvedené tabulce 4.2¹.

Parametr	Hodnota
Hustota [kg/dm ³]	2,21
Sypná měrná hmotnost [kg/dm ³]	od 0,5 do 1,3
Teplota rozkladu [°C]	> 50

Zdroj: Bezpečnostní list produktu

Tab. 4.2 Fyzikální a chemické vlastnosti bikarbonátu sodného

Z jiných materiálů od společnosti Soda Polska Ciech SA se můžeme dozvědět další informace o granulometrii bikarbonátu sodného, které jsou uvedeny v tab. 4.3.

Granulometrie [μm]	Hodnota [°C]
< 50	13,9
50-100	24,8
100-150	25,5
150-200	20
200-250	11,7
250-300	3,8
200-350	0,3
Průměrná velikost (střední zrno)	126,0

Zdroj: Chemické listy 2012 – Sorption properties of sodium bicarbonate

Tab. 4.3 Granulometrie bikarbonátu sodného dodávaného společností Soda Polska Ciech SA

¹ Bezpečnostní list: Podle nařízení (ES) č. 1907/2006. 2013. 30.8.2013.

4.3 Čištění spalin pomocí sody bikarbony

Základní teoretické poznatky čištění spalin pomocí sody bikarbony byly uvedeny v kapitole 3.3.5 této práce.

4.4 Faktory ovlivňující účinnosti čištění spalin pomocí sody bikarbony

Mezi základní faktory ovlivňující účinnost procesu čištění spalin patří:

- Teplota spalin
 - Při teplotách pod 140 °C je reakce velmi pomalá
 - Při teplotách nad 400 °C dochází k sintraci bikarbony
- Jemnost bikarbony – s vyšší jemností se zvětšuje reakční povrch
- Reakční doba²

4.5 Použití TRONY

Kromě bikarbonátu sodného je možné s podobnými výsledky pro čištění spalin použít i TRONU ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Základní rozdíly mezi bikarbonátem sodným a tronou jsou uvedeny v tab. 4.4.

	TRONA	Bikarbonát sodný
Rovnice	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	NaHCO_3
Průměrná velikost d_{50}	30 μm	110 μm
Čistota	$\geq 97 \%$	$\geq 99 \%$

Tab. 4.4 Srovnání sody bikarbony a trony

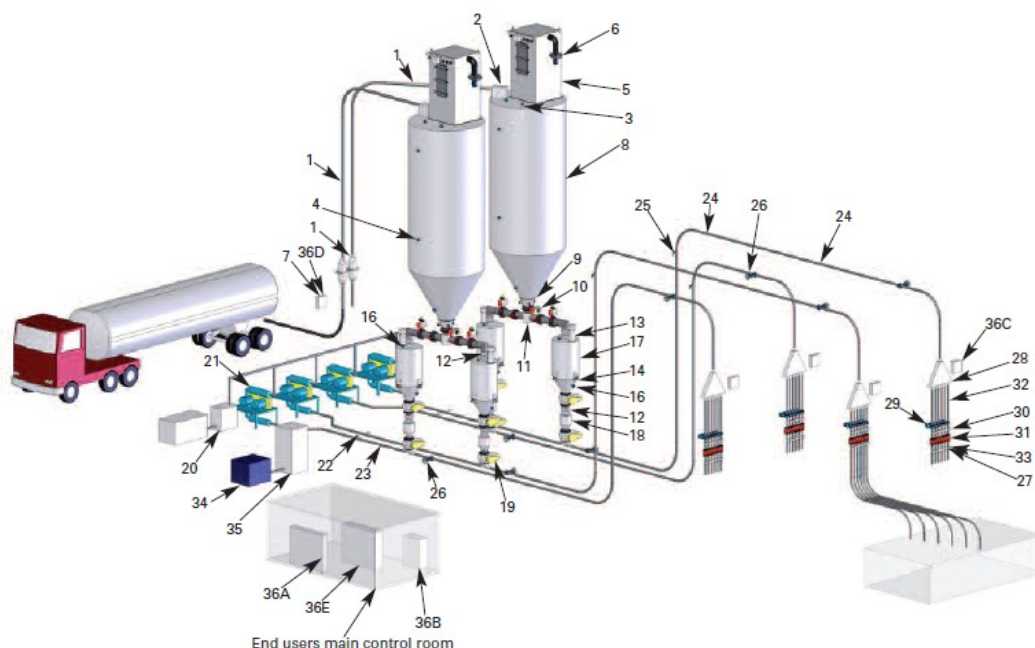
4.6 Účinnosti čištění spalin pomocí sody bikarbony

V odborné literatuře je pospáno, že 2,3 kg sody bikarbony je schopno neutralizovat 1 kg HCl a 2,6 kg sody neutralizuje 1 kg SO_2 . Nejčastěji je soda bikarbena dávkována s přebytkem 1,25. Vše záleží na lokálních podmínkách.

² TATA Chemical Europe: Sodium Bicarbonate Flue Gas Treatment [online]. [cit. 2016-05-10].

4.7 Klasické uspořádání aplikace čištění spalin pomocí sody bikarbony

Nejčastěji používané zapojení aplikace dávkování sody bikarbony do spalin je na obr. 4.2.



Obr. 4.2 Klasické uspořádání systému pro skladování a dávkování sody bikarbony

Zdroj: CSC Publishing Inc, Air Pollution Control



Obr. 4.3 Instalace splitteru v provozu

Zdroj: Sorb-N-Ject TM Technology – Dry Hydrated Lime Injection For Coal-Fired Boiler Flue Gas Desulfurization



Obr. 4.4 Splitter zajišťující rovnoměrnou distribuci vzduchu a bikarbony do jednotlivých trubních vedení

Zdroj: Sorb-N-Ject TM Technology – Dry Hydrated Lime Injection For Coal-Fired Boiler Flue Gas Desulfurization

4.8 Okrajové podmínky návrhu odsíření

4.8.1 Dosahované hodnoty emisí

V tab. 4.5 je uvedena časová řada emisí práškového granulačního kotle K3. V tabulce 4.5 jsou rovněž uvedeny teploty spalin před komínem v místě kontinuálního měření emisí a dále obsah síry v palivu.

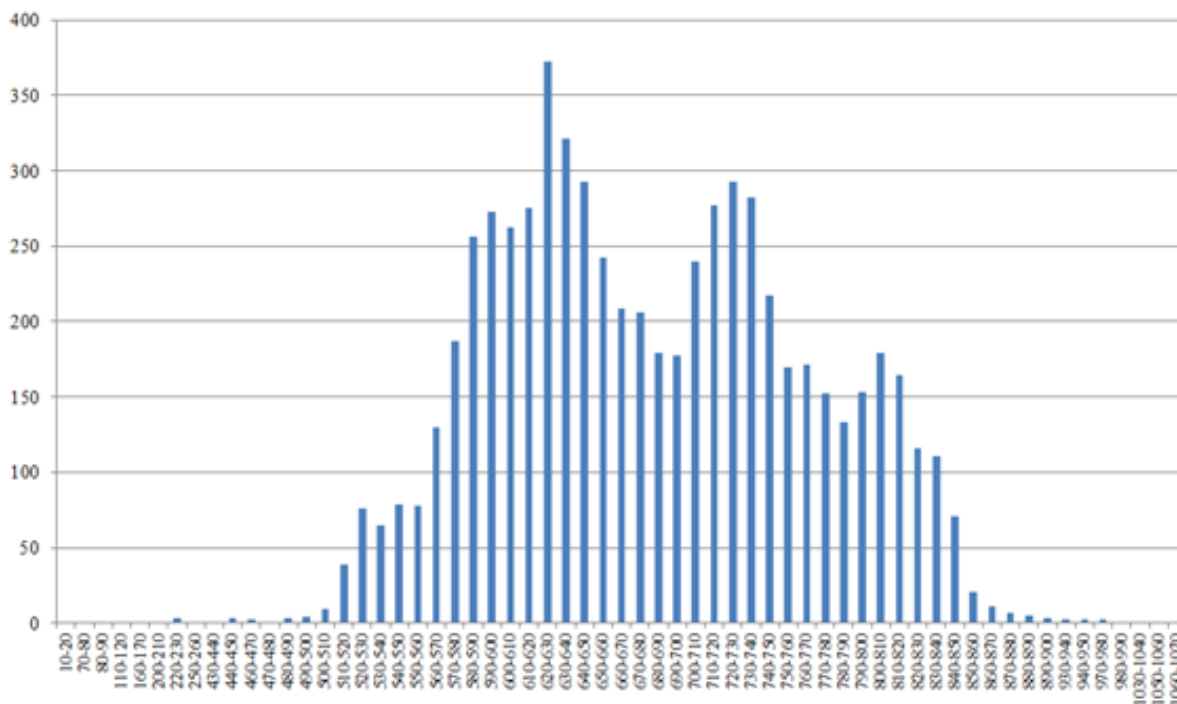
Parametr/rok	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Teplota spalin [°C]	98,6	99,8	92,0	79,4	89,3	95,2
Emise TZL [mg/Nm ³]	10,58	15,51	13,56	15,15	15,11	41,37
Emise SO ₂ [mg/Nm ³]	800,19	795,58	795,95	764,62	784,52	683,78
Emise NO _x [mg/Nm ³]	585,16	591,84	549,6	524,98	528,43	503,48
Emise CO [mg/Nm ³]	22,45	20,42	28,14	35,92	32,29	27,73
Emise SO ₂ [t/rok]	190,97	177,59	220,97	159,57	109,01	125,14
Koncentrace síry v palivu S ^r [%]	0,44	0,43	0,40	0,43	0,40	0,36

Tab. 4.5 Dosahované koncentrace emisí a procentní zastoupení síry v palivu

Teplárna Olomouc je v současné době zařazena v přechodovém národním plánu a nejpozději k 30.6.2020 musí začít plnit nové emisní limity. Pokud by byl kotel K3 provozován bez omezení celoročně, musel by dosahovat koncentrací emisí NO_x a SO₂ pod hodnotami 200 mg/Nm³ a zároveň by musel kotel plnit emisní limit tuhých znečišťujících látek pod hodnotou 20 mg/Nm³. Pokud by byl kotel K3 provozován po dobu 1500 hodin, platily by pro kotel K3 tzv. specifické limity, tj. výstupní koncentrace SO₂ by musela být pod 800 mg/Nm³ při výstupní koncentraci TZL pod 20 mg/Nm³. Zároveň by pro emise NO_x platil emisní limit 450 mg/Nm³. Z předchozího textu je zřejmé, že pro obě varianty je nutné stávající elektrostatický odlučovač a předřazený mechanický odlučovač nahradit

novým tkaninovým filtrem. Budoucích emisí SO_2 na úrovni 200 mg/Nm^3 je možné ekonomicky dosáhnout pouze instalací polosuché metody odsíření. Emise NO_x by muselo být řešeno kombinací primárních a sekundárních opatření.

Z tabulky 4.5 je patrné, že průměrná roční koncentrace SO_2 se pohybuje od roku 2012 pod hodnotou specifického limitu, ale fluktuace emisí SO_2 tak, jak je patrné z histogramu půlhodin emisí SO_2 překračuje nový zákonný specifický limit SO_2 na úrovni 800 mg/Nm^3 .



graf 4.1 Histogram emisí SO_2 na kotli K3 v roce 2015

4.8.2 Teploty spalin v zadním tahu kotle a za kotlem

Důležitým faktorem návrhu aplikace sody bikarbony je volba místa vstřiku bikarbony do spalin. Obecně se tyto aplikace realizují tak, že soda je injektována buď do zadního tahu kotle nebo za kotel. V ČR je převážná část aplikací realizována do druhého tahu, i když některé aplikace byly prvotně realizovány s foukáním bikarbony do kouřovodů za kotel před elektrostatické odlučovače nebo tkaninové filtry. Z dispozičního řešení kotle připadali v úvahu dvě výškové úrovně, a to výšková úroveň 15,432 m a výšková úroveň 10,284 m. V případě výškové úrovně 15,432 m by docházelo k foukání bikarbony před ohřívák vzduchu číslo 2 a v případě výškové úrovně 10,284 m před EKO I. Další možností je zaústění bikarbony do kanálů spalin za kotel. Výškové úrovně a jednotlivé výhřevné plochy jsou znázorněny na obrázku 4.4. V rámci diplomové práce bylo nutné prošetřit

teploty spalin v těchto místech. Toto je možné u provozovaného kotle realizovat trojím způsobem a to buď:

- s využitím tisků provozních obrazovek
- odladěným tepelným výpočtem
- speciálním externím měřením měřící skupinou

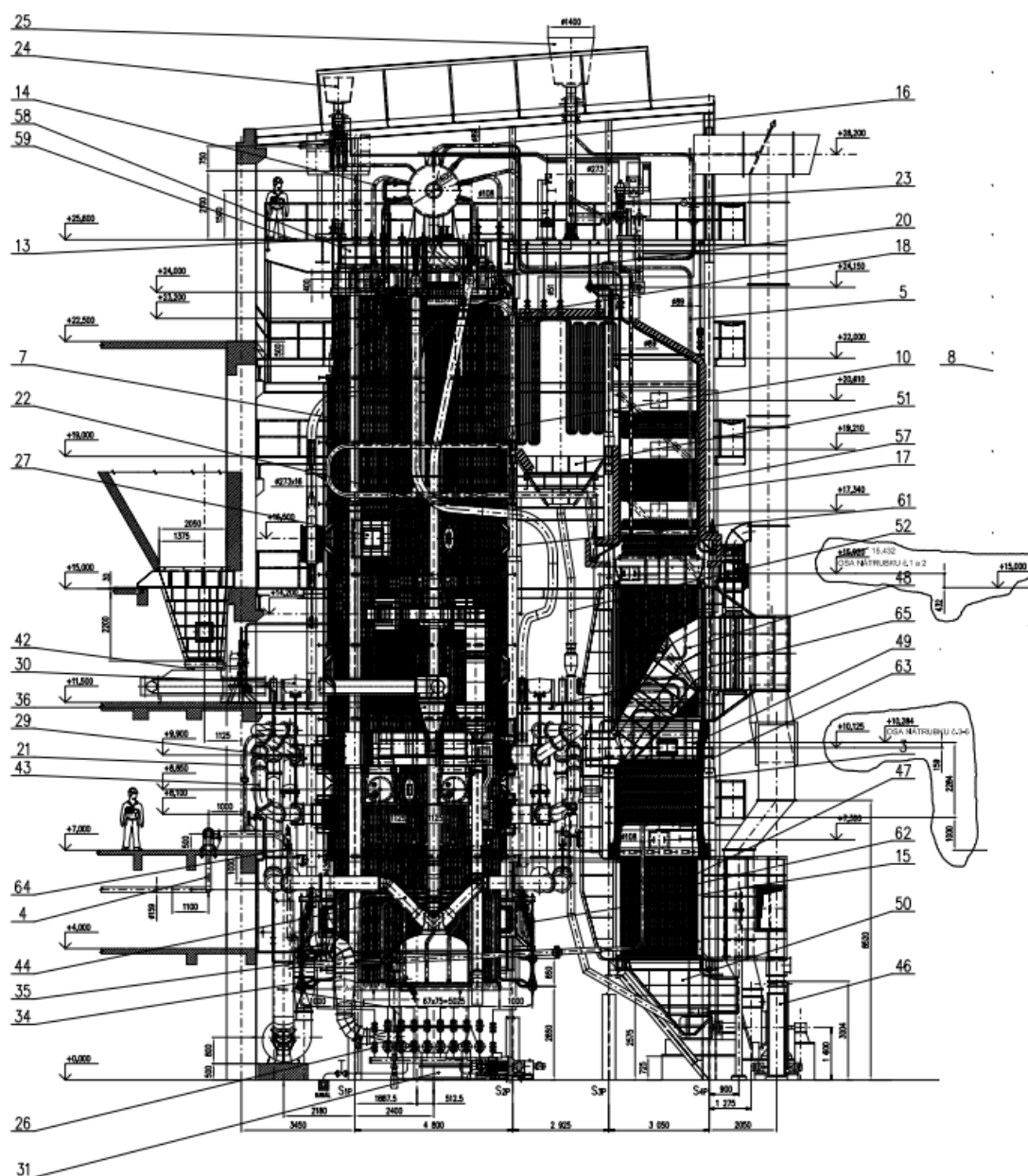
K ověření teplotních poměrů došlo s využitím výsledků tepelného výpočtu kotle realizovaného společností Protis Ostrava Inženýring, s.r.o.³ Teploty spalin v inkriminovaných místech jsou uvedeny v tab. 4.6.

Výkon kotle [t/h]	100	80	60	45 při provozu M31	45 při provozu M32
Teplota spalin před OVZ2 – výšková úroveň 15,432 m [°C]	426	393	349	310	302
Teplota spalin před EKO I – výšková úroveň 10,284 m [°C]	300	284	261	237	232
Teplota za kotlem [°C]	144	139	129	119	117

Tab. 4.6 Teploty spalin za kotlem

³ JIRUŠE, Zdeněk, Petr POLACH a Zdeněk URBAN. *Posouzení možnosti denitrifikace a návrh výměny hořáků práškového granulačního kotle K3: Technická studie*. Ostrava, 2011.

Z výše realizované analýzy je s ohledem na riziko sintrace sody bikarbony se jako nejvýhodnější jeví pro vstřik pozice před EKO I. Teploty za kotlem jsou značně nízké a dá se očekávat, že vstřik sorbentu za kotlem by dal mnohem horší výsledky než vstřik sorbentu před EKO I. V rámci návrhu vstřikovacích míst je nutné posoudit i další aspekty a uvažované úpravy kotle K3. V průběhu následujících tří let má dojít k výměně spodního dílu ohřívače vzduchu, a to s ohledem skutečnost, že tento ohřívač je značně napaden abrazí a korozí. K dnešnímu dni je zaslepeno cca 14 % trubek a ohřívač vzduchu se blíží konci své životnosti.

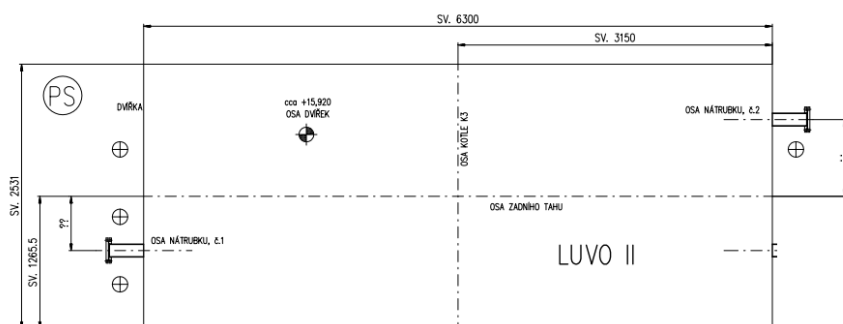


Obr. 4.5 Schéma posuzovaných míst vstřiku bikarbony

Z tohoto pohledu byla řešena ve spolupráci s Ing. Zdeňkem Jirušem z projekční kanceláře Protis Ostrava Inženýring, s.r.o. i otázka, jak velké dopady bude mít modifikace OVZ I (jeho zkrácení o 400 mm) na návrh systému dávkování sody bikarbony. Důvodem zkrácení OVZI je skutečnost, že zastavěnost kotelny po dokončení rekonstrukce kotle K3 v roce 1999 neumožňuje jeho prostou náhradu. Z tepelných výpočtů realizovaných projekční kanceláří Protis Ostrava Inženýring, s.r.o. pro objednatele vyplynulo:

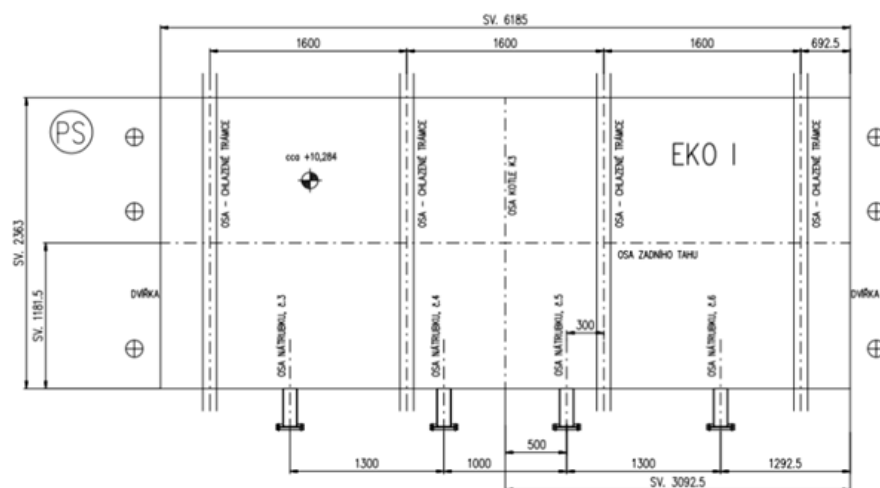
- na maximálním výkonu kotle je před EKOI dosaženo nejenom požadované teploty spalin 300 °C, ale příznivé jsou i teploty spalin za kotlem na úrovni cca 150 °C
- podobně teploty spalin okolo 300 °C je ještě dosaženo před EKO I, ale již ne za kotlem, kde teplota klesá pod 115 °C, avšak zvýšení teploty spalin, zejména za kotlem by bylo možné dosáhnout recirkulací spalin na úrovni 25 %.⁴

Na podlaží +10,284 m, na rozdíl od výškové kóty +15,432 m je možné zajistit i lepší penetraci prostoru spalovací komory než je tomu na podlaží +15,432 m. Možné zaústění trysek je patrné z obr. 4.4 a 4.5.



Obr. 4.6 Dispoziční možnosti zaústění trysek na výškové úrovni + 15,432 m

⁴ JIRUŠE, Zdeněk. *Posouzení poměrů na koncových plochách kotle K3 z hlediska odsíření metodou dávkování sody bikarbony: Technická studie P-TZ-16-002*. Ostrava, 2016.



Obr. 4.7 Dispoziční možnosti zaústění trysek na výškové úrovni + 10,284 m

4.9 Reakční doba

Teoretická doba setrvání částičky reagentu po smíchání se spaliny od místa zavedení před EKO I po výstupní přírubu kotle je při výkonu kotle 100 t/h 1,9 sekundy a při min. výkonu 45 t/h 3,1 sekundy. Je však možno předpokládat, že odsiřovací reakce bude ještě dále pokračovat ve spalínovém kanále při teplotě cca 150 °C až do mechanických odlučovačů, kdy již budou spaliny s reagentem dostatečně promíseny. Při odhadnuté délce spalínových kanálů do mechanických cyklónů 8 m se tak doba setrvání částice reagentu ve spalínách při max. výkonu prodlouží o 0,7 sekundy a při min výkonu o 1,1 sekundy. Poměry po náhradě mechanického a elektrostatického odlučovače tkaninovým odlučovačem budou vzhledem k uvažovaným dispozicím podobné.

4.10 Stechiometrické výpočty

V tabulce 4.7 jsou uvedeny parametry spalovaného uhlí.

Kvalitativní znak	Vzorek v surovém stavu (r)	Bezvodý vzorek (d)	Hořlavina (daf)
Voda hrubá [%]	5,64		
Voda zbytková [%]	0,59		
Voda Celková [%]	6,23		
Popel [%]	18,19	19,40	
Hořlavina [%]	75,58	80,60	100
Spalné teplo Q_s [kJ.kg ⁻¹]	27 034	28 830	35 769
Výhřevnost Q [kJ.kg ⁻¹]	26 048	27 942	34 667
Prchavá hořlavina [%]	20,20	21,54	26,72
Neprchavá hořlavina [%]	55,38	59,06	73,28
Vodík H [%]	3,80	4,05	5,02
Uhlík C [%]	65,94	70,32	87,25
Dusík N [%]	0,91	0,97	1,20
Kyslík O [%]	4,77	5,09	6,32
Síra veškerá S_r [%]	0,40	0,43	
Síra v popelu S_a [%]	0,24	0,26	
Síra prchavá S_{vk} [%]	0,16	0,17	

Tab. 4.7 Parametry spalovaného uhlí

Technologie je dále navržena na vzorek paliva dle tab. 4.7. V reálné praxi by však bylo nutné zohlednit krajní polohy spalovaných paliv současně a v budoucnu.

Cílem následujících výpočtů je určit objem vzduchu pro spalování 1 kg paliva a objem spalin, které při spalování vznikají. Výpočet se označuje jako objemový, a to pro model dokonalého spalování. Při dokonalém spalování uvažujeme veškeré vyhoření hořlaviny. Rozdíl oproti výpočtu nedokonalého spalování, který připouští pouze částečné vyhoření paliva a vznik nedopalu je zanedbatelný, na konečné výsledky bude mít minimální vliv.

Stechiometrické výpočty uvažují s hodnotami paliva v surovém stavu. Výsledky jsou vztaženy Nm³ (normální metr krychlový - $T_n = 273$ K, $p_n = 101\,325$ kPa), při čemž se předpokládá, že kyslík vázaný v hořlavině paliva se při spalování uvolní a zapojí se do

procesu hoření, takže o toto množství můžeme snížit přívod kyslíku z nasávaného vzduchu.

a) Potřeba vzduchu a složení spalin

Minimální objem kyslíku

$$V_{O_2min} = 22,39 \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S_{prch}^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right)$$

$$V_{O_2,min} = 22,39 \cdot \left(\frac{0,659}{12,01} + \frac{0,038}{4,032} + \frac{0,0016}{32,06} - \frac{0,048}{32} \right) = 1,407 [Nm^3 \cdot kg^{-1}]$$

Minimální objem suchého vzduchu je podílem objemového kyslíku v suchém vzduchu

$$V_{VS,min} = \frac{O_{O_2min}}{0,21} = \frac{1,407}{0,21} = 6,7 [Nm^3 \cdot kg^{-1}]$$

Minimální objem vlhkého vzduchu odpovídá zvětšení o součinitel podílu vodní páry připadající na 1 Nm³, který je pro běžné klimatické podmínky možno volit hodnotě $\chi_v=1,016$ [-]. Tato hodnota přibližně odpovídá relativní vlhkosti vzduchu $\varphi=70$ % a teplotě $t_v=20$ °C.

$$V_{VV,min} = \chi_v \cdot V_{VS,min} = 1,016 \cdot 6,7 = 6,81 [Nm^3 \cdot kg^{-1}]$$

Podíl vodní páry z tohoto objemu je tedy

$$V_{H_2O}^V = V_{VV,min} - V_{VS,min} = (\chi_v - 1) \cdot V_{VS,min} = (1,016 - 1) \cdot 6,7 = 0,107 [Nm^3 \cdot kg^{-1}]$$

Pro výpočet objemu skutečného objemu vzduchu volím přebytek vzduchu $\alpha=1,2$ [-].

$$V_{VV} = V_{VV,min} \cdot \alpha = 6,81 \cdot 1,2 = 8,172 [Nm^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem CO₂ ve spalinách

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r = \frac{22,26}{12,01} \cdot 0,659 = 1,221 [Nm^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem SO₂ ve spalinách

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,0016 = 0,0011 [Nm^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem N₂ ve spalinách

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28,014} \cdot N^r + V_{VS,min} = \frac{22,4}{28,014} \cdot 0,0091 + 6,7 = 6,712 [Nm^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem argonu, který zahrnuje i další vzácné plyny

$$V_{Ar} = 0,0092. V_{VS,min} = 0,0092.6,7 = 0,062 [Nm^3.kg^{-1}]$$

Objem H₂O ve spalínách

$$V_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,4}{18,016} \cdot W^r + V_{H_2O}^V = \frac{44,8}{4,032} \cdot 0,038 + \frac{22,4}{18,016} \cdot 0,0623 + 0,107 \\ = 0,61 [Nm^3.kg^{-1}]$$

Objem suchých spalín

$$V_{SS,min} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{Ar} = 1,221 + 0,0011 + 6,712 + 0,062 \\ = 7,996 [Nm^3.kg^{-1}]$$

Objem vlhkých spalín

$$V_{SV,min} = V_{SS,min} + V_{H_2O}^S = 7,996 + 0,61 = 8,606 [Nm^3.kg^{-1}]$$

Objem spalín

$$V_{SV} = V_{SV,min} + (\alpha - 1). V_{VV,min} = 8,606 + (1,2 - 1). 6,81 = 9,968 [Nm^3.kg^{-1}]$$

b) Procentuální zastoupení jednotlivých škodlivých látek v proudu spalín

$$x_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{SV,min}} = \frac{1,221}{8,608} \cdot 100 = 14,19 [\%]$$

$$x_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{SV,min}} = \frac{0,002731}{8,608} \cdot 100 = 0,032 [\%]$$

$$x_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{SV,min}} = \frac{6,712}{8,608} \cdot 100 = 77,96 [\%]$$

$$x_{Ar} = \frac{V_{Ar}}{V_{SV,min}} = \frac{0,062}{8,608} \cdot 100 = 0,718 [\%]$$

$$x_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{SV,min}} = \frac{0,61}{8,608} \cdot 100 = 7,1 [\%]$$

$$\sum x_i = 14,18 + 0,032 + 77,96 + 0,717 + 7,1 = 99,989 \cong 100 [\%]$$

c) Hustota vzduchu a spalin

K výpočtu hustoty vzduchu potřebujeme znát hustotu vodní páry obsažené ve vzduchu $\rho=0,8058 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$ a hustotu suchého vzduchu $\rho=1,293 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$.

$$\rho_{VV} = \frac{V_{VS,min} \cdot \rho_{VS} + (\chi_V - 1) \cdot V_{VS,min} \cdot \rho_{H_2O}}{V_{VV,min}} = \frac{6,7 \cdot 1,293 + (1,016 - 1) \cdot 6,7 \cdot 0,806}{6,81}$$

$$= 1,285 \text{ [Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

K výpočtu hustoty stechiometrických spalin ($\alpha=1$) potřebujeme znát hustoty jednotlivých složek spalin. Do výpočtu je třeba zahrnout i objem vodní páry obsažené ve vzduchu $V_{H_2O}^V$.

Prvek spalin	ρ_{CO_2}	ρ_{SO_2}	ρ_{N_2}	ρ_{Ar}
Hustota [kg.m ⁻³]	1,9768	2,9262	1,2505	1,7839

Tab. 4.8 hustota prvků spalin

$$\rho_{SV,min} = \frac{\sum_i V_i \cdot \rho_i}{V_{SV,min}} \text{ [Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

$$\rho_{SV,min}$$

$$= \frac{1,221 \cdot 1,9768 + 0,0011 \cdot 2,9262 + 6,712 \cdot 1,2505 + 0,062 \cdot 1,7839 + 0,107 \cdot 0,8058}{8,606}$$

$$= 1,279 \text{ [Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

Vypočtené hustoty platí pro stav za normálních podmínek. Pro podmínky přibližné provozu ($t_s=150 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_s=-50\text{Pa}$) provedeme přepoččet.

$$\rho_{SV}^{t_s,p_s} = \rho_{SV} \cdot \frac{273}{t_s + 273} \cdot \frac{p_s}{0,101325} = 1,280 \cdot \frac{273}{150 + 273} \cdot \frac{0,101275}{0,101325} = 0,826 \text{ [Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

$$\rho_{VV}^{t_s,p_s} = \rho_{VV} \cdot \frac{273}{t_s + 273} \cdot \frac{p_s}{0,101325} = 1,285 \cdot \frac{273}{150 + 273} \cdot \frac{0,101275}{0,101325} = 0,829 \text{ [Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

d) Entalpie vzduchu a spalin

Výpočet entalpie spalin se provádí jako součet entalpií jednotlivých složek spalin včetně rozptýlených částic popílků. Pro přehlednější vyjádření je hodnota entalpie spalin vztažená na jednotkové množství paliva. Dle literatury dokonalost spalování prakticky nemá vliv na výsledný objem spalin, pouze na koncentraci výskytu jednotlivých složek. Následující hodnoty entalpie vzduchu a spalin jsem zvolil dle literatury (5).

$$I_{S,min}^t = \sum V_i \cdot i_i^t + a_u \cdot A^r \cdot i_{pop}^t$$

Přepočet entalpie spalin na entalpii spalin o $t=150\text{ }^{\circ}\text{C}$, které vzniknou spálením 1 kg paliva při přebytku vzduchu $\alpha=1,2$ [-].

$$I_S^{t,\alpha} = I_{S,min}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{V,min}^t = 1794,863 + (1,2 - 1) \cdot 222,4 = 1839,343 [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Pro výpočet entalpie vzduchu jsem ze zdroje (5) zvolil hodnoty entalpií při teplotě vzduchu $t=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $i_{vs}^t = 32,57 [\text{kJ} \cdot \text{Nm}^{-3}]$, $i_{H_2O}^t = 39,1 [\text{kJ} \cdot \text{Nm}^{-3}]$.

$$I_V^t = V_{VS,min} \cdot i_{VS}^t + V_{H_2O}^V \cdot i_{H_2O}^t = 6,7 \cdot 32,57 + 0,107 \cdot 39,1 = 222,4 [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Tepelná bilance kotle

Kotel je zařízení, které transformuje chemickou energii vázanou v palivu a umožňuje její předání pracovnímu médiu (voda, pára). Transformace energie a její předání pracovnímu médiu je doprovázeno řadou ztrát, které je nutno definovat pro výpočet účinnosti spalování kotle.

a) Redukovaná výhřevnost

Pro určení účinnosti je třeba znát tepelný příkon přiváděný do kotle, který se vyjádří z redukované výhřevnosti paliva. Ta sumarizuje celkové teplo přivedené do kotle vztažené na jednotkové množství paliva.

$$Q_{i,red} = Q_i^r + i_{pv}$$

Redukovaná výhřevnost zahrnuje ještě teplo přivedené cizím zdrojem, které je nejčastěji předáno v parním ohříváku nasávaného vzduchu. Dále pak teplo přivedené parou při ofukování stěn nebo rozprašování mazutu. Posledním možným zvýšením přivedeného tepla je teplo přivedené ve spalinách z recirkulace. Kotel těmito prvky nedisponuje, jsou tedy zanedbány. Fyzické teplo paliva se určí ze vztahu.

$$i_{pv} = c_{pv} \cdot t_{pv}$$

kde c_{pv} je měrná tepelná kapacita paliva a t_{pv} je teplota paliva, kterou volím $t_{pv}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Měrná tepelná kapacita je určena pomocí následujícího vztahu, kde c_{su} je měrné teplo sušiny, která je pro černé uhlí udávána $c_{su}=1,00 [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$

$$\begin{aligned} c_{pv} &= 4,19 \cdot W^r + c_{su} \cdot (1 - W^r) = 4,19 \cdot 0,0623 + 1 \cdot (1 - 0,0623) \\ &= 1,199 [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \end{aligned}$$

$$i_{pv} = c_{pv} \cdot t_{pv} = 1,199 \cdot 20 = 23,98 [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Redukovaná výhřevnost tedy je

$$Q_{i,red} = Q_i^r + i_{pv} = 26048 + 23,98 = 26072 [kJ \cdot kg^{-1}]$$

b) Tepelné ztráty a účinnost spalování

Účinnost spalovacího procesu snižuje pět základních ztrát:

- Z_c - ztráta mechanickým nedopalem
- Z_{co} - ztráta chemickým nedopalem
- Z_{sv} - ztráta sáláním a vedením tepla
- Z_f - Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
- Z_k - Ztráta citelným teplem spalin

c) Ztráta mechanickým nedopalem

Ztráta mechanickým nedopalem představuje ztrátu nespálenou hořlavinou v tuhých zbytcích, kterou můžeme najít v následujících částech kotle.

Z_{cs} - ztráta nedopalem ve škváře nebo strusce - v tuhých zbytcích zachycených v ohništi

Z_{cp} - ztráta nedopalem v popílku - ve frakcích zachycených v průtazích kotle

$Z_{cú}$ - ztráta nedopalem v úletu - v tuhých zbytcích unášených spalinami

Z_{cr} - ztráta nedopalem v roštovém propadu - pouze u roštových kotlů, pokud se nevrací propad zpět

Z_{cb} - ztráta uhelným práškem v brýdách - u práškových kotlů s otevřeným mlecím okruhem

V případě granulačního kotle K3 TOL připadá v úvahu ztráta nedopalem ve škváře nebo strusce Z_{cs} a ztráta nedopalem v úletu $Z_{cú}$.

$$Z_C = Z_{cs} + Z_{cú}$$

jednotlivé ztráty vypočítáme ze vzorce

$$Z_{ci} = \frac{C_i}{1 - C_i} \cdot X_i \cdot \frac{A^r}{Q_{i,red}} \cdot Q_{ci}$$

Podíl úletového popelu X_i pro ztrátu mechanickým nedopalem je dle literatury 75%, a Q_{ci} , průměrná výhřevnost hořlaviny tuhých zbytků $Q_{ci} = 32\,600$ [kJ/kg]. A^r je obsah popela v palivu. Hodnoty spalitelných látek v tuhých zbytcích v úletu a ve škváře jsou použity z výpočtového modelu kotle K3 TOL firmy PROTIS Inženýring, s.r.o.

$$C_{\dot{u}} = 11\% = 0,11[-]$$

$$C_s = 5\% = 0,05[-]$$

$$Z_{cs} = \frac{0,11}{1 - 0,11} \cdot 0,75 \cdot \frac{0,1819}{26072} \cdot 32600 = 0,0211 \cong 2,11[\%]$$

$$Z_{c\dot{u}} = \frac{0,05}{1 - 0,05} \cdot 0,2 \cdot \frac{0,1819}{26072} \cdot 32600 = 0,00239 \cong 0,239[\%]$$

$$Z_C = Z_{cs} + Z_{c\dot{u}} = 2,11 + 0,239 = 2,349 [\%]$$

d) Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

Představuje ztrátu tepla ve škváře, úletu nebo propadu. Citelné teplo spalin v úletu je zahrnuto do entalpie spalin, ztráta tepla v propadu se v případě granulačního kotle neuvažuje. Počítá se obdobně jako ztráta mechanickým nedopalem. Hodnoty X_i , A^r , Q_{ired} mají stejný význam jako u ztráty mechanickým nedopalem, c_i je měrná tepelná kapacita tuhých zbytků při teplotě $t_i=600$ [°C], kterou je možné zvolit u granulačních ohnišť.

$$Z_f = \frac{X_s}{1 - C_s} \cdot \frac{A^r}{Q_{i,red}} \cdot c_s \cdot t_s = \frac{0,2}{1 - 0,05} \cdot \frac{0,1819}{26072} \cdot 0,9301 \cdot 600 = 0,00082 \cong 0,082[\%]$$

e) Ztráta chemickým nedopalem

Ztráta chemické energie nespálených plynů unášených spalinami, kde $mgCO$ je emisní limit CO a $O_{2,ref}$ je obsah kyslíku pro referenční stav spalin.

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot mgCO \cdot O_{SS,min}}{(21 - O_{2,ref}) \cdot Q_{i,red}} = \frac{0,2116 \cdot 250 \cdot 7,996}{(21 - 6) \cdot 26072} = 0,00108 \cong 0,108[\%]$$

f) Ztráta sáláním a vedením tepla

Tato ztráta zohledňuje množství tepla, které uniká pláštěm kotle do okolí. Velikost této ztráty ovlivňuje kvalita izolace stěn, způsob oplechování, velikost povrchu a výkonu kotle. Předběžný odhad lze odečíst z grafu, kde velikost povrchu kotle je nahrazena jeho

jmenovitým výkonem v závislosti na použitém palivu.

$$Z_{sv100} = Z_{svj} \cdot \frac{Q_{vyr,j}}{Q_{vyr}} = 0,0055 \cdot \frac{81690}{81690} = 0,0055 \cong 0,55[\%]$$

$$Z_{sv45} = Z_{svj} \cdot \frac{Q_{vyr,j}}{Q_{vyr}} = 0,0046 \cdot \frac{81690}{36767} = 0,0102 \cong 1,02[\%]$$

g) Ztráta citelným teplem spalin

Představuje ztrátu tepla odcházející ve spalinách. Jedná se o ztrátu, která nejvíce ovlivňuje výslednou účinnost kotle. Její velikost je odvislá od teploty spalin a přebytku vzduchu ve spalinách za kotlem.

$$Z_{k100} = (1 - Z_c) \cdot \frac{I_s^{t_k, \alpha_s} - \alpha_k \cdot I_{VZ}}{Q_{i,red}} = (1 - 0,01416) \cdot \frac{1731 - 1,146,13}{26072} = 0,0635$$

$$\cong 6,35[\%]$$

$$Z_{k45} = (1 - Z_c) \cdot \frac{I_s^{t_k, \alpha_s} - \alpha_k \cdot I_{VZ}}{Q_{i,red}} = (1 - 0,01416) \cdot \frac{2026,23 - 1,35.46,13}{26072} = 0,0743$$

$$\cong 7,43[\%]$$

h) Účinnost kotle

Účinnost kotle vypočítáme tzv. nepřímou metodou - odečtem vypočtených ztrát.

$$\mu_{k100} = 1 - 0,02349 - 0,00082 - 0,00108 - 0,0055 - 0,0635 = 0,9056 \cong 90,56[\%]$$

$$\mu_{k45} = 1 - 0,02349 - 0,0082 - 0,00108 - 0,0102 - 0,0743 = 0,8901 \cong 89,01[\%]$$

ch) Vyrobené teplo v páře

Lze označit jako celkový tepelný výkon. Výpočet je proveden pro výkonové hladiny 100 [t/h] a 45 [t/h], potřebné hodnoty jsou uvedeny v tab. 4.9.

Entalpie napájecí vody a páry		
Ostrá pára	$i_{pp} [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	3358
Napájecí voda	$i_{nv} [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	444,5
Vstřikovací odluh	$i_v [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	444,5
Odluh	$i_w [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	1244,93
Průtok média při výkonové hladině 100[t/hod]		

Ostrá pára	$M_{pp} [kg.s^{-1}]$	27,8
Vstřikovací odluh	$M_v [kg.s^{-1}]$	2,28
Odluh	$M_o [kg.s^{-1}]$	0,6
Průtok média při výkonové hladině 45 [t/hod]		
Ostrá pára	$M_{pp} [kg.s^{-1}]$	12,5
Vstřikovací odluh	$M_v [kg.s^{-1}]$	1,8
Odluh	$M_o [kg.s^{-1}]$	0,6

Tab. 4.9 parametry médií

$$Q_V = M_{PP} \cdot (i_{PP} - i_{nv}) + M_V \cdot (-i_{nv}) + M_O \cdot (i_v - i_w)$$

$$Q_{V100} = 27,8 \cdot (3358 - 444,5) + 2,28 \cdot (-444,5) + 0,6 \cdot (1244,93 - 444,5) \\ = 80462,1 [kJ.s^{-1}]$$

$$Q_{V45} = 12,5 \cdot (3358 - 444,5) + 1,8 \cdot (-444,5) + 0,6 \cdot (1244,93 - 444,5) \\ = 36098,9 [kJ.s^{-1}]$$

i) Množství paliva

Stejně jako v předchozím případě je výpočet proveden pro výkonové hladiny 100 [t/h] a 45 [t/h].

$$M_{pal100} = \frac{Q_{V100}}{Q_{i,ref} \cdot \mu_{100}} = \frac{80462,1}{26072,0,9056} = 3,41 [kg.s^{-1}]$$

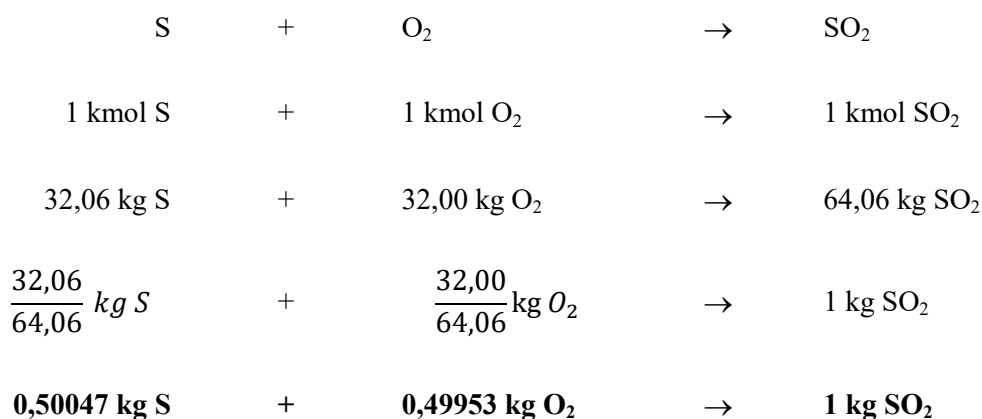
$$M_{pal45} = \frac{Q_{V45}}{Q_{i,ref} \cdot \mu_{45}} = \frac{36098,9}{26072,0,8901} = 1,56 [kg.s^{-1}]$$

Kromě skutečného množství paliva je uveden i výpočet výpočtového množství paliva, které se používá při dalších výpočtech množství vzduchu a spalin, naopak pro výpočet mlécích okruhů se používá skutečné množství paliva.

$$M_{pal,v45} = M_{pal45} \cdot (1 - Z_C) = 1,56 \cdot (1 - 0,02349) = 1,52 [kg.s^{-1}]$$

4.11 Bilanční výpočet potřebného množství $NaHCO_3$ k odsíření SO_2

Pro stanovení spotřeby sorbentu je nutné vypočítat množství síry ve spalinách. Z následující chemické reakce můžeme konstatovat, že z 1 kg síry vzniknou 2 kg SO_2 .



a) Vstup do odsiřovacího zařízení

Vstupní koncentrace SO₂ ve vlhkých spalínách při 6% O₂

$$\rho_{SO_2} = \frac{A_r^{SO_2}}{N_V} = \frac{32,066 + 2.15,9994}{22,414} = 2,858 \text{ [kg.Nm}^{-3}\text{]}$$

$$C_{SO_2}^{in} = x_{SO_2} \cdot \rho_{SO_2} = \frac{0,032}{100} \cdot 2,858 = 0,000915 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]} = 915 \text{ [mg.m}^{-3}\text{]}$$

Tok SO₂ do odsiřovacího zařízení

$$\dot{m}_{SO_2 vst} = V_{6\%O_2 N}^R \cdot C_{SO_2}^{in} = 48,29 \cdot 0,000915 = 0,043 \text{ [kg.s}^{-1}\text{]} = 155 \text{ [kg.hod}^{-1}\text{]}$$

Tok síry do kotle

$$\dot{m}_{S vst} = \dot{m}_{SO_2 vst} \cdot 0,50047 = 0,043 \cdot 0,50047 = 0,0215 \text{ [kg.s}^{-1}\text{]} = 77,4 \text{ [kg.hod}^{-1}\text{]}$$

b) Výstup z odsiřovacího zařízení

Pro celoroční provoz kotle musí TOL splňovat emisní limit, který stanovuje koncentraci SO₂ v suchých spalínách při 6 % O₂ 200 [mg.Nm⁻³]

$$C_{SO_2}^{out} = 200 \text{ [mg.Nm}^{-3}\text{]}$$

Při uvažování provozu kotle 1500 [hod/rok] musí TOL splňovat emisní limit, který stanovuje koncentraci SO₂ v suchých spalínách při 6% O₂ 800 [mg.Nm⁻³]

Tok SO₂ z odsiřovacího zařízení

$$\dot{m}_{SO_2 v\dot{y}st}^R = V_{6\%O_2 such} \cdot C_{SO_2}^{out,R} = 43,8 \cdot 200 \cdot 10^{-6} = 0,00876 \text{ [kg.s}^{-1}\text{]} = 32 \text{ [kg.hod}^{-1}\text{]}$$

$$\begin{aligned}\dot{m}_{SO_2 v\acute{y}st}^{1500} &= V_{6\%O_2such} \cdot C_{SO_2}^{out,1500} = 43,8 \cdot 800 \cdot 10^{-6} = 0,035 [kg \cdot s^{-1}] \\ &= 126 [kg \cdot hod^{-1}]\end{aligned}$$

Účinnost odsiřovacího procesu

$$\eta^R = \frac{\dot{m}_{SO_2 vst} - \dot{m}_{SO_2 v\acute{y}st}}{\dot{m}_{SO_2 vst}} = \frac{0,043 - 0,00876}{0,043} = 0,796 [-] = 79,6\%$$

$$\eta^{1500} = \frac{\dot{m}_{SO_2 vst} - \dot{m}_{SO_2 v\acute{y}st}}{\dot{m}_{SO_2 vst}} = \frac{0,043 - 0,035}{0,043} = 0,186 [-] = 18,6\%$$

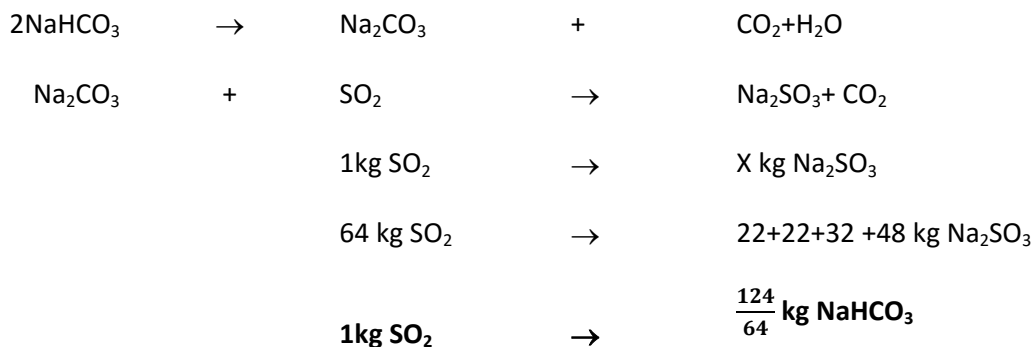
Množství SO₂ k odsíření

$$\dot{m}_{SO_2,o}^R = \dot{m}_{SO_2 vst} \cdot \eta^R = 155,0,796 = 123,4 [kg \cdot hod^{-1}]$$

$$\dot{m}_{SO_2,o}^{1500} = \dot{m}_{SO_2 vst} \cdot \eta^{1500} = 155,0,186 = 28,8 [kg \cdot hod^{-1}]$$

c) Množství NaHCO₃ potřebné k odsíření 1 kg SO₂

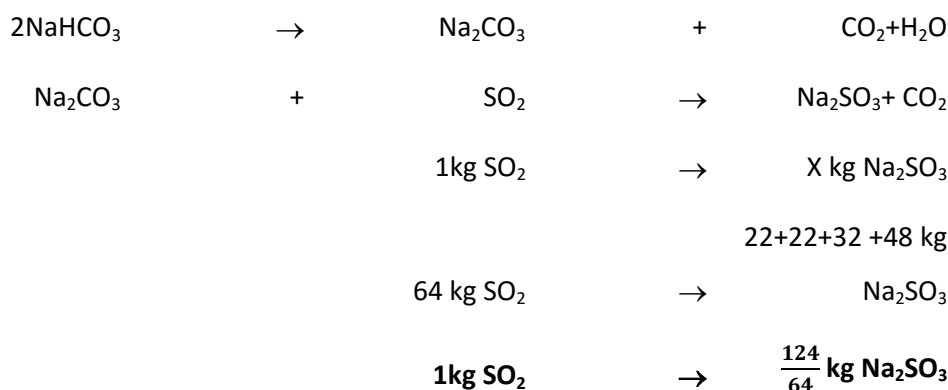
Hmotnostní tok NaHCO₃ potřebný pro odsíření 1kg SO₂ je vypočítán z následující chemické reakce. Hodnota $x_{NaHCO_3} = \frac{124}{64} [-]$ je stanovena jako stechiometrická, proto je nutné pro uplatnění v praxi hodnotu navýšit o $\alpha_{NaHCO_3} = 1,2 [-]$.



$$\dot{m}_{NaHCO_3}^{R,100} = \dot{m}_{SO_2,o}^R \cdot x_{NaHCO_3} \cdot \alpha_{NaHCO_3} = 123,4 \cdot \frac{124}{64} \cdot 1,2 = 286,9 [kg \cdot hod^{-1}]$$

$$\dot{m}_{NaHCO_3}^{1500,100} = \dot{m}_{SO_2,o}^{1500} \cdot x_{NaHCO_3} \cdot \alpha_{NaHCO_3} = 28,8 \cdot \frac{124}{64} \cdot 1,2 = 66,96 [kg \cdot hod^{-1}]$$

d) Balance produktu z odsíření



Produkce produktu odsíření při stechiometrickém výpočtu odstranění 100 [%] SO₂ ze spalin.

$$\dot{m}_{\text{Na}_2\text{SO}_3} = \dot{m}_{\text{SO}_2 \text{vst}} \cdot x_{\text{Na}_2\text{SO}_3} = 0,043 \cdot \frac{124}{64} = 0,0833 [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] = 299,9 [\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}]$$

Množství produktu odsíření při požadované vypočtené účinnosti odsíření pro celoroční provoz a provoz omezený na 1500 [hod/rok].

$$\dot{m}_{\text{Na}_2\text{SO}_3}^{R,100} = \dot{m}_{\text{SO}_2 \text{vst}} \cdot x_{\text{Na}_2\text{SO}_3} \cdot \eta^R = 0,043 \cdot \frac{124}{64} \cdot 0,796 = 0,066 [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] = 239 [\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}]$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{\text{Na}_2\text{SO}_3}^{1500,100} &= \dot{m}_{\text{SO}_2 \text{vst}} \cdot x_{\text{Na}_2\text{SO}_3} \cdot \eta^{1500} = 0,043 \cdot \frac{124}{64} \cdot 0,186 = 0,0155 [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \\
 &= 56 [\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}]
 \end{aligned}$$

Analogickým postupem předchozích výpočtů je proveden výpočet pro výkon kotle 45[t.hod⁻¹]. Výsledky jsou zaznamenány v následující tabulce 4.10.

Černé uhlí – výkon kotle 45 [t/hod]			
Množství paliva	$M_{\text{pal}45}$	1,52	[kg · s ⁻¹]
Tok vlhkých spalin 4,6% O ₂	$V_{4,6\% \text{O}_2}$	15,15	[m ³ · s ⁻¹]
Tok vlhkých spalin při 6% O ₂	$V_{6\% \text{O}_2}^R$	21,53	[m ³ · s ⁻¹]
Tok suchých spalin při 6% O ₂	$V_{6\% \text{O}_2 \text{such}}$	20	[m ³ · s ⁻¹]
Tok síry do kotle (v palivu)	\dot{m}_{Svst}	0,00986	[kg · s ⁻¹]
		35,5	[kg · hod ⁻¹]
Tok SO ₂ do odsířovacího zařízení	$\dot{m}_{\text{SO}_2 \text{vst}}$	0,0197	[kg · s ⁻¹]
		70,92	[kg · hod ⁻¹]

Tok SO ₂ z odsiřovacího zařízení, celoroční provoz	$\dot{m}_{SO_2}^{R, výst}$	0,004 14,4	[kg.s ⁻¹] [kg.hod ⁻¹]
Potřebná účinnost odsíření při celoročním provozu	$\mu_{\check{C}UR}$	79,69	[%]
Množství SO ₂ k odsíření	$\dot{m}_{SO_2,o}^{R,45}$	56,5	[kg.hod ⁻¹]
Množství NaHCO ₃ pro odsíření SO ₂	$\dot{m}_{NaSO_3}^{R,45}$	131	[kg.hod ⁻¹]
Množství produktu z odsíření při celoročním provozu	$\dot{m}_{NaSO_3}^{1500,100}$	0,03 110	[kg.s ⁻¹] [kg.hod ⁻¹]
Tok SO ₂ z odsiřovacího zařízení, provoz 1500 [hod/rok]	$\dot{m}_{SO_2}^{1500, výst}$	0,016 57,6	[kg.s ⁻¹] [kg.hod ⁻¹]
Potřebná účinnost odsíření při provozu 1500 [hod/rok]	$\mu_{\check{C}U1500}$	18,77	[%]
Množství SO ₂ k odsíření	$\dot{m}_{SO_2,o}^{1500,45}$	13,3	[kg.hod ⁻¹]
Množství NaHCO ₃ pro odsíření SO ₂	$\dot{m}_{NaSO_3}^{1500,45}$	31	[kg.hod ⁻¹]
Množství produktu k odsíření při provozu 1500 [hod/rok]	$\dot{m}_{NaSO_3}^{1500,100}$	0,007 26	[kg.s ⁻¹] [kg.hod ⁻¹]

Tab. 4.10 Balance SO₂ při výkonu kotle 45 [t/hod]

4.12 Návrh technologie odsíření pomocí sody bikarbony

4.12.1 PI diagram

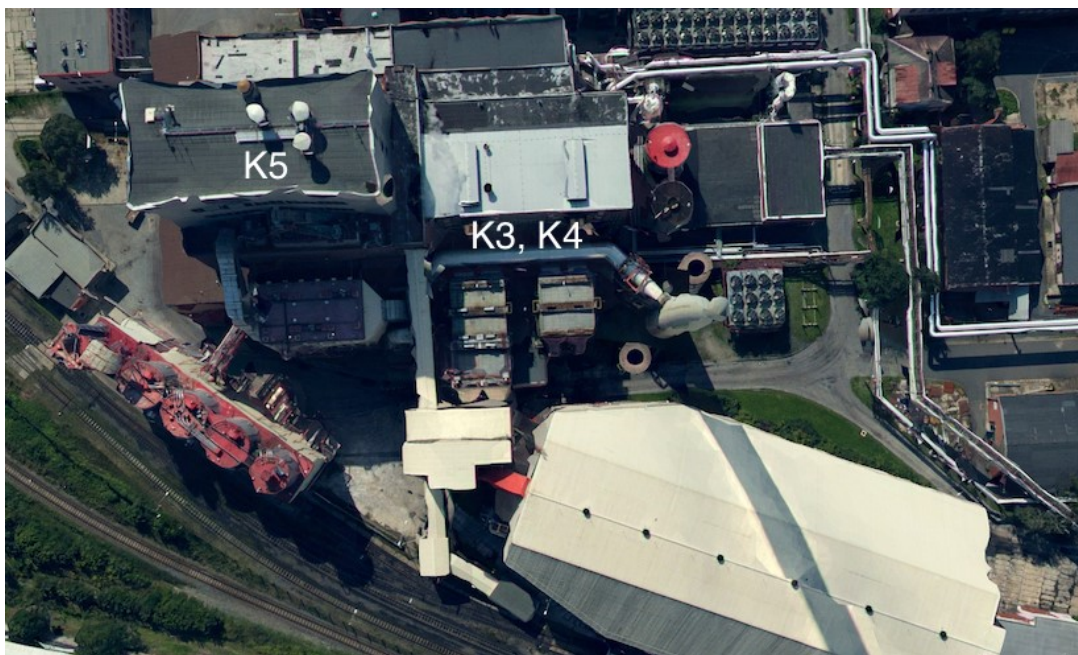
Vlastní práce na návrhu technologie byla zahájena návrhem zapojení systému, který byl realizován na základě prohlídky tří aplikací v ČR. Používají se dva systémy zapojení a to systém s umístěním ventilátoru na výstupní straně mlýna a systém s umístěním ventilátoru před mlýnem, tj. na čisté straně. S ohledem na rizika zanášení kol ventilátorů jsem zvolil systém se zapojením ventilátoru na čisté straně.

S ohledem na dispoziční možnosti areálu byla zvolena koncepce bez mezizásobníku bikarbony na kotelně. Tato koncepce se mi zdála výhodnější s ohledem na skutečnost, že odpadá problematika pseudoprava z centrálního sila do malého mezizásobníku, který bývá situován na kotelně blízko zadních tahů kotle a kouřovodů. PI diagram je uveden v příloze A – Technologické schéma diplomové práce.

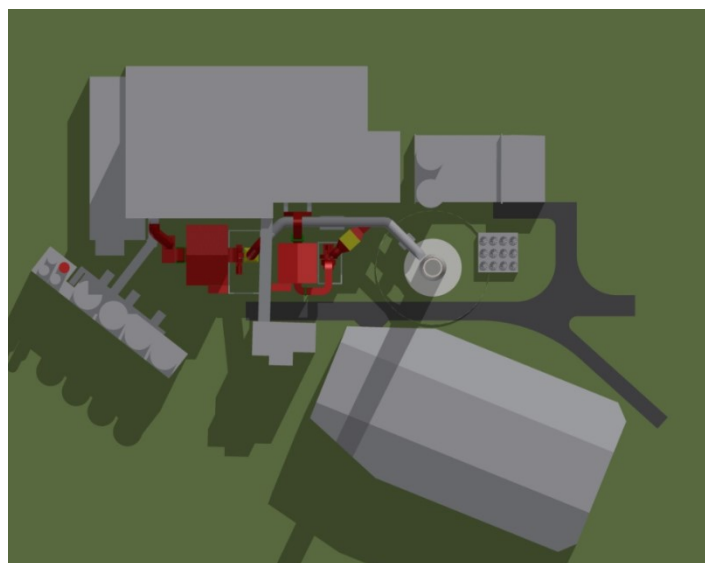
4.12.2 Situování technologie

Na obrázku 4.6. je satelitní snímek zákotlí kotle K3, kde se nachází mechanický a elektrostatický odlučovač kotle K3 a mechanický a elektrostatický odlučovač

neprovozovaného kotle K4. Oba odlučovače by měly být v rámci výstavby odprášení kotle K3 demontovány a na jejich pozicích by mělo dojít k výstavbě nového tkaninového flitru tak, jak je patrné z obr 4.9.

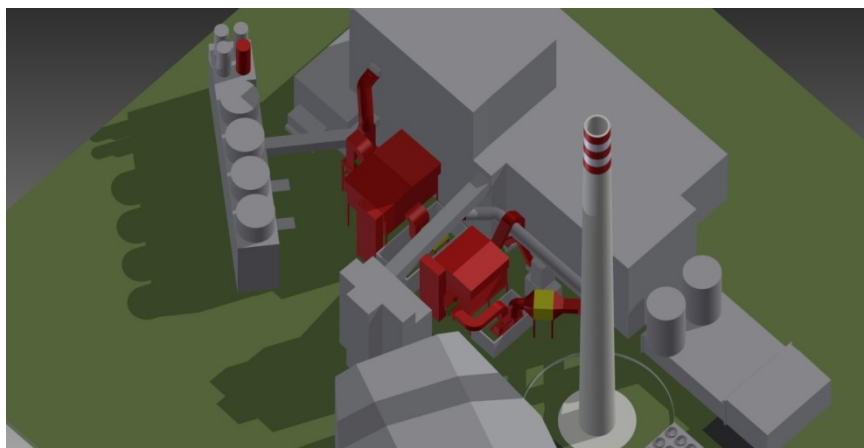


Obr. 4.8 Satelitní snímek zákotlí



Obr. 4.9 Dispozice nového odprášení kotle K3

Zdroj: studie provozovatele



Obr. 4.10 3D snímek budoucího odprášení kotle K3

Zdroj: studie provozovatele

Mezi novým tkaninovým filtrem a komínem vzniká volný stavební prostor pro situování uvažované technologie sody bikarbony. Prostorová rezerva byla ověřena srovnáním s některými navštívenými aplikacemi. Prostorové řešení potřebné pro návrh pneumatických tras je patrné z přílohy č. 2 – Axonometrie potrubní trasy diplomové práce.

4.12.3 Velikost sila

Velikost sila byla zvolena o objemu 45 m^3 . Při odsíření uvažovaného uhlí na výstupní úroveň emisí SO_2 $200[\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3}]$ tento objem zásob vystačí na 226 [hod] (9,4 dní) provozu.

a) Konstrukce odsíření odsíření

Celkové prostorové řešení je patrné z přílohy č. 4 Situační plán.

b) Objekt odsíření

Vlastní technologie bude umístěna v nadzemním objektu tvořeného z převážné části ocelovou konstrukcí. Pro 45 m^3 vychází průměr sila na úrovni cca 3,1 m a výšce 15,38 m. Silo bude vybaveno potřebnou bezpečnostní a legislativní výstrojí, kterou je odsávací filtr, plnicí potrubí, kontrolní vlez, ocelový žebřík, pojistný ventil apod. Vysypka sila bude opatřena standardním vyprazdňovacím zařízením od společnosti Sodimate, které mechanicky rozruší případnou klenbu. Předpokládají se rozměry stavby 5,46 x 5,89 x 2,63 m.

c) Plnění sila

Plnění sila bude zajišťováno externím dodavatelem pomocí pneumatické přepravy z autocisteren. Kapacita cisteren je $32 [\text{m}^3]$ a stáčení doba se pohybuje okolo 1,5[hod]. Na

začátku pneumatické přepravy bikarbony do sila bude umístěn uzamykatelný bajonetový uzávěr. Předpokládá se stáčení s využitím kompresorového vzduchu z autocisterny. Po celou dobu stáčení se předpokládá provoz odsávacího filtru.

4.13.4 Doprava sody bikarbony ze sila do mlýnu

Doprava sorbentu ze sila do mlýna je zajištěna pomocí dvou šnekových dopravníků. Jeden z dopravníků pokrývá dopravované množství v případě maximálního výkonu kotle nebo zvýšených koncentrací síry v palivu a provozu na emisní limit SO_2 200 $[\text{mg.Nm}^{-3}]$ a druhý zajišťuje dopravu sorbentu pro případ provozu kotle 1500 $[\text{hod/rok}]$, tedy emisní limit 800 $[\text{mg.Nm}^{-3}]$. Potřebné množství dopravovaného sorbentu vztaženého k určitému emisnímu limitu, a tedy i ke způsobu provozu kotle je uvedeno v tab. 4.11.

Provoz kotle / emise SO_2	Emisní limit 200 mg.Nm^{-3}	Specifický emisní limit 800 mg.Nm^{-3}
Potřebné množství dopravovaného sorbentu při maximálním výkonu kotle $\dot{m}_{\text{NaSO}_3}^{100} [\text{kg.hod}^{-1}]$	239	56

Tab. 4.11 Potřebné množství sorbentu

Pro výpočet průměru šneku dopravníku je nutné znát objemový dopravní výkon, který se vypočítá z podílu potřebného množství dopravovaného sorbentu a sypné objemové hmotnosti dopravovaného materiálu.

$$Q_{v,\text{potr}}^1 = \frac{\dot{m}_{\text{NaSO}_3}^{100}}{\gamma} = \frac{239}{1200} = 0,199 [\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$$

Objemový dopravní výkon lze vypočítat i jiným způsobem, ze kterého následně vyjádříme průměr šneku dopravníku. K výpočtu je potřeba znát součinitel zaplnění žlabu, který je dle literatury pro jemný práškovitý materiál stanoven na hodnotu $\psi = 0,45 [-]$. Stoupání závitů šroubovice, které předběžně volím $s=0,045 [\text{m}]$. Počet otáček, které literatura udává v rozmezí 2-4 $[\text{ot.min}^{-1}]$ a součinitel C_H , který upravuje hodnotu vzhledem ke sklonu dopravy. Jelikož doprava materiálu je vodorovná, hodnota $C_H=1 [-]$.

$$D_{\text{vyp}} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_v}{3600 \cdot \pi \cdot s \cdot \psi \cdot n \cdot C_H}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,199}{3600 \cdot \pi \cdot 0,045 \cdot 0,45 \cdot 3 \cdot 1}} = 0,034 [\text{m}]$$

Podle vypočteného průměru je zvolen dle katalogu firmy RATAJ a. s. nejbližší vyšší průměr šneku dopravníku, který je $D=0,045$ [m], následně je přepočítán na objemový dopravní výkon pro parametry zvoleného šneku, které jsou uvedeny v tab. 4.4.

$$Q_v^1 = 3600 \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \cdot s \cdot \psi \cdot n \cdot C_H = 3600 \cdot \frac{\pi \cdot 0,045^2}{4} \cdot 0,06 \cdot 0,45 \cdot 3 \cdot 1 = 0,412 \text{ [m}^3 \cdot \text{h}^{-1}\text{]}$$

$$Q_v^1 > Q_{v,potr}^1$$

Rozměry navrhnutého šnekového dopravníků dostávají pro dopravované množství. V posledním kroku zbývá vypočítat elektrický příkon pro pohon dopravníku. K tomuto výpočtu je potřeba znát vodorovnou dopravní vzdálenost $l_{vz}=51$ [m], dopravní výšku $h=15$ [m] a součinitel celkového odporu dopravovaného materiálu, který pro sodu bikarbonu volím $w=3$ [-].

$$P_{el}^1 = \frac{Q_v \cdot g}{3600} \cdot (l_v \cdot w + h) = \frac{0,412 \cdot 9,81}{3600} \cdot (51 \cdot 3 + 15) = 0,192 \text{ [w]}$$

Šnekový dopravník o průměru 0,045 [m] je od firmy RATAJ a. s. nejmenší možný. Pro případ provozu kotle na omezený provoz volím šnekový dopravník stejných rozměrů. V případě poruchy tak bude sloužit jako duplicitní v plném rozsahu výkonu.

Tab. 4.12 Vypočtené hodnoty druhého šnekového dopravníku

Šnekový dopravník č. 1, 2			
Dopravní výkon	Q_v^1	0,412	$[\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]$
Vnější průměr šneku	$D_{vnější}^1$	0,045	[m]
Vnitřní průměr šneku	$D_{vnitřní}^1$	0,015	[m]
Stoupání závitu	s	0,045	[m]
Tloušťka spirálu	t	5	[m]
Otáčky šneku	n	4	$[\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}]$

Tab. 4.13 Základní technické údaje dopravníku č. 1 a č. 2

4.13.5 Úprava sody bikarbony mletím

Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách pro zlepšení procesů, zejména procesů odsíření je nutné zajistit vhodnou granulometrii sody bikarbony. V tabulce 4.8 jsou uvedeny vlivy mletí na měrný povrch aditiva.

Materiál	Střední velikost zrna	Plocha před teplotní	Plocha po teplotní aktivaci na 300 °C

	[μm]	aktivací [g/m^2]	[g/m^2]
Původní soda	126	0,07	3,99
Pomletá soda	13,2	0,73	5,97

Tab. 4.8: Dopady mletí sody bikarbony na její fyzikální vlastnosti⁵

V aplikacích s přípravou sody bikarbony se poměrně často pracuje s mlýny od společnosti HOSOKOWA s třídiči POWDERPLEX. Tyto mlýny jsou uzpůsobeny pro mletí bikarbonátu sodného se zrnitostí vsázky $d_{50} = 200 \mu\text{m}$. Do mlýna se pomocí podávacího zařízení podává bikarbona šnekovým zařízením.



Obr. 4.11 Pohled na nejčastěji používanou konstrukci mlýna používaného

⁵ WALAWSKA, Barbara. *Nitrogen oxides removal from lue gases using: CHEMIK 2013, 67, 10, 903–912. 2013.*



Obr. 4.12 Detail vnitřních částí mlýna

Zdroj: Mlýn z jedné aplikace v ČR

Pro mletí sorbentu na požadovaný rozměr. Je uvažováno s klasifikačním mlýnem APP 200. Před mlýnem bude umístěn dopravní ventilátor. Před mlýnem bude umístěn směšovací kus dopravního vzduchu a sorbentu. Předpokládá se, že jemnost mletí bude nastavena v rámci provozních zkoušek. Granulometrii sorbentu na výstupu z mlýna bude ovlivňována množstvím proudícího vzduchu.

Velikost mlýna je zvolena podle kapacity. Běžná kapacita mlýna APP200 je 200 [kg.h⁻¹], je ale schopný vyvinout maximální dopravované množství až 320 [kg.h⁻¹], pro vypočtený hmotnostní tok $\dot{m}_{NaSO_3}^{R,100} = 239 [kg.h^{-1}]$ je tedy dostačující. V tab. 4.14 Jsou uvedeny jeho základní technické parametry.

Typ	ALPINE Powderplex – Classifier Mill 200 APP	
Kapacita	200 (Max 320)	[kg.h ⁻¹]
Granulometrie	$d_{90} = 20 - 35$	[μm]
Průtok vzduchu	Max 1400	[m ³ .h ⁻¹]
Otáčky mlýnu	3500	[ot.min ⁻¹]
Motor	22/300/50	[kW]/[ot.min ⁻¹]/[Hz]

Tab. 4.14 Technické údaje mlýnu APP 200

4.13.6 Doprava sody bikarbony do kotle

V kapitole 4.8 byla provedena volba optimálního místa pro injektáž bikarbony. V kapitole 4.12.2 bylo provedeno základní situování stavby. S ohledem na znalost výchozího a koncového bodu bylo možné navrhnout geometrii trasy pneumatické dopravy bikarbony. Tato trasa je uvedena v příloze D – situační plán.

4.13.7 Návrh pneumatické dopravy

Dimenzování pneumatické dopravy se skládá z výpočtu tlakové ztráty potrubí, návrhu ventilátoru a jeho pracovního bodu. Pracovní bod ventilátoru je průsečíkem charakteristik potrubí a ventilátoru.

a) Výpočet tlakových ztrát dopravního potrubí

Tlaková ztráta potrubního systému se skládá z tlakových ztrát místních a tlakových ztrát třecích. Tlaková ztráta místních odporů závisí na geometrickém tvaru kanálu, způsobuje ji tedy změna směru proudu vzduchu. Ztráta třením při proudění vzduchu v potrubí je odvislá zejména od rychlosti proudění, délce potrubí, ekvivalentním průměru potrubí a součiniteli tření λ , který je odvislý od druhu proudění a drsnosti vnitřního povrchu potrubí.

V prvním kroku výpočtu je nutné znát druh proudění média v potrubí, který se určí dle hodnoty Reynoldsova čísla. Rychlost proudění v kanálu na vstupu do kotle jsem zvolil podle doporučení z předchozích aplikací pneumatické dopravy bikarbony v rozmezí 10 – 15 [m.s⁻¹]. Délka potrubní sítě a skladba jejích částí s hodnotami potřebnými pro výpočet je uvedena v tab. 4.15.

Hodnoty λ a ξ jsou zvoleny dle tabulkových hodnot z literatury (6).

	ks	l[m]	d[m]	λ [-]	ξ [-]
Rovné potrubí	-	42,2	0,2	0,045	-
Rovné potrubí	-	20,6	0,1	0,045	-
Koleno 90°	7	-	200/100	-	0,5
Splitter	1	1	-	-	1,5

Tab. 4.15 Části dopravní trasy

Pro výpočet Reynoldsova čísla je nutné znát kinematickou viskozitu, která je stanovena pro vzduch o teplotě 20 [°C] na hodnotu $\nu = 1,49 \cdot 10^{-5}$ [m².s⁻¹].

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} = \frac{8,0,2}{1,49 \cdot 10^{-5}} = 107\,382 [-]$$

$$Re > 4000 \rightarrow \text{Turbulentní proudění}$$

V dalším kroku vypočítáme tlakovou ztrátu třením pro rovné části potrubní trasy. Hodnoty potrubních prvků jsou uvedeny v tab. 4.15. Hustota vzduchu o teplotě 20 [°C] je $\rho = 1200$ [kg.m³]

$$\Delta p^1 = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{w^2}{2} \rho = 0,045 \cdot \frac{42,2}{0,2} \cdot \frac{8^2}{2} \cdot 1,2 = 464,6 [Pa]$$

$$\Delta p^2 = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{w^2}{2} \rho = 0,045 \cdot \frac{20,6}{0,1} \cdot \frac{14^2}{2} \cdot 1,2 = 1090,1 [Pa]$$

Z následujícího vzorce vypočítáme tlakovou ztrátu místní. Součinitele místního odporu tvarových částí potrubí jsou uvedeny v tab. 4.5. Dle doporučení je možné pro zjednodušení rozdělovač SPLITTER počítat jako dvojnásobný kalhotový kus. Jelikož místní tlaková ztráta není závislá na průměru potrubí, můžeme rovnici vynásobit počtem kusů kolen.

$$\Delta p_m^1 = 3 \cdot \xi \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho = 3 \cdot 0,5 \cdot \frac{8^2}{2} \cdot 1,2 = 57,6 [Pa]$$

$$\Delta p_m^2 = 4 \cdot \xi \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho = 4 \cdot 0,5 \cdot \frac{14^2}{2} \cdot 1,2 = 176,4 [Pa]$$

$$\Delta p_{split} = \xi \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho = 1,5 \cdot \frac{4^2}{2} \cdot 1,2 = 15,2 [Pa]$$

Dopravovaný vzduch prochází přes klasifikační mlýn, u kterého se dle doporučení počítá s tlakovou ztrátou 8 – 11 [kPa]. O tuto hodnotu je nutné tlakovou ztrátu navýšit.

Celková tlaková ztráta je součtem tlakových ztrát místních a třecích.

$$\Delta p = \sum \Delta p^i + \sum \Delta p_m^i + \sum \Delta p_{split} + \Delta p_{mlýn} = 9871,8 [Pa]$$

b) Návrh ventilátoru

Pro návrh ventilátoru je potřeba znát kromě potřebné tlakové ztráty i objemové množství dopravovaného vzduchu, které se vypočítá z průřezu potrubí a rychlosti proudění vzduchu.

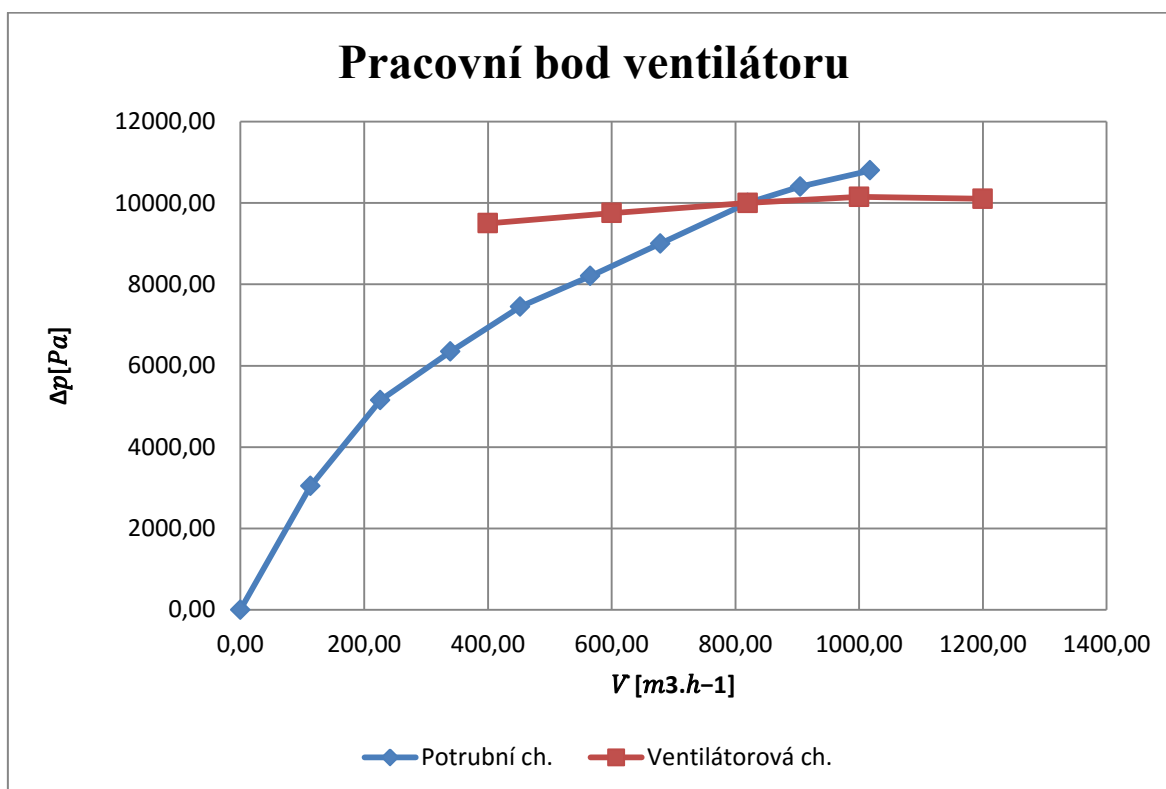
$$\dot{V} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot w = \frac{\pi \cdot 0,2^2}{4} \cdot 8.3600 = 820,78 [m^3 \cdot h^{-1}]$$

Pro pneumatickou dopravu sody bikarbony jsem zvolil vysokotlaký ventilátor RVJ 800 od firmy Kovodružstvo Stražov (7). Tento ventilátor svým pracovním bodem odpovídá potřebnému dopravovanému množství vzduchu a tlakové ztrátě potrubí. Pracovní bod ventilátoru můžeme vidět na grafu 4.2 jakožto průsečík výkonové charakteristiky ventilátoru a charakteristiky potrubního systému. Základní technické parametry ventilátoru jsou uvedeny v tab. 4.6. Hodnoty pro tvorbu grafu jsou získány z katalogového listu výrobce ze zdroje (7).

Celkový tlak	16	[kPa]
--------------	----	-------

Napětí	230/400	[V]
Frekvence	50	[Hz]
Otáčky	3400	[ot.min ⁻¹]
Výkon motoru	15	[kW]
Váha	277	[kg]

Tab. 4.16 Základní parametry ventilátoru



graf 4.2 Pracovní bod ventilátoru

4.13.8 Elektro

Z předchozího dimenzování je možné odhadnout potřebný příkon technologie. Odhad příkonu jednotlivých spotřebičů je v tab. 4.17.

Zařízení	Odhadovaný příkon [kW]
Vyhrnovací zařízení	0,18
Dopravní šnek 1	0,19
Dopravní šnek 2	0,19
Rotační podavač	0,37

Dopravní ventilátor	15
Mlýn	22
Ostatní	1
Rezerva	1
Celkem	39,93

Tab. 4.17 Odhadovaný příkon el. zařízení

4.13.9 MaR a řídicí systém kotle

V tabulce 4.18 jsou uvedeny průměrné potřeby I/O signálů z různých aplikací sody bikarbony.

Signál do DCS	Potřebné počty signálů
AI	11
AO	3
DI	50
DO	11

Tab. 4.18 Průměrné potřeby I/O signálů

Na obr 4.13 je pro ilustraci uvedena kopie obrazovky z jedné referenční návštěvy aplikace sody bikarbony odkud jsem čerpal při zpracování mé diplomové práce. .

5 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout s využitím dostupných informací technologii suchého odsíření na bázi sody bikarbony pro práškový granulační kotel K3. Navržený koncepční návrh technologie odsíření pomocí sody bikarbony odpovídá i budoucímu prostorovému uspořádání po výstavbě tkaninového filtru na kotli K3. Vlastní diplomová práce zahrnovala základní bilanční výpočty na straně kotle a výpočet základních technologických uzlů uvažovaného odsíření.

V rámci diplomové práce se bylo nutné vyrovnat i s návrhem pneumatické dopravy bikarbony pomocí vzduchu do kotle, kde bylo zvoleno její rovnoměrné zaústění napříč kanálem spalin.

Teoretická část diplomové práce mi umožnila nastudovat legislativu upravující emise stacionárních zdrojů znečišťování a získat širší přehled o nejčastěji používaných odsiřovacích metodách. Práce je doplněna o informace z rešerší dostupné zahraniční literatury.

Na závěr mohu dodat, že práce byla pro mě velmi obohacující nejen kvůli získaným znalostem, ale především kvůli získání základních projekčních návyků v rámci systémového přístupu.

6 Citovaná literatura

1. *enwiki.cz*. [Online] 3. 5 2010. <http://www.enviwiki.cz/wiki/REZZO>.
2. Ministerstvo životního prostředí. *www.mzp.cz*. [Online] 10. 4 2015. http://www.mzp.cz/cz/prechodny_narodni_plan_cr.
3. *cs.wikipedia.org*. [Online] 17. 1 2016. https://cs.wikipedia.org/wiki/Kyselý_děšť.
4. European commission, Institut for prospective technological studies. Integrovaná prevence a omezování znečištění. [Online] <http://www.ippc.cz/obsah/CF0198/vlastni-dokumenty-bref/velka-spalovaci-zarizeni>.
5. Dlouhý, Tomáš. *Výpočty kotlů a splinových výměníků*. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2007. str. 207. ISBN 978-80-01-03757-7.
6. Černý, Václav, Janeba, Břetislav a Tyessler, Jiří. *Parní kotle*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983. str. 852. L12-E1-IV-41/22601.
7. Kovodružstvo Stražov. *kovostrazov.cz*. [Online] <http://www.kovostrazov.cz/rvj.html>.
8. Ministerstvo životního prostředí. *Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší*. §1, odst. 1) : autor neznámý.
9. Ibler, Tomáš. *Technický průvodce energetika*. Praha : Nakladatelství BEN - technická literatura, 2002. str. 616. ISBN 80-7300-026-1.
10. Rataj a.s. Rataj. [Online] http://www.rataj.cz/sites/default/files/2009/08-11/n_vod_k_pou_v_n_dopravn_ku_typ_rl_rln_rl_81624.pdf.
11. Haluza, Tomáš. *www.vutbr.cz*. [Online] 2012. https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=55109.
12. Hosokawa Alpine a.s. Hosokawa - Alpine. [Online] <https://www.hosokawa-alpine.com/powder-particle-processing/machines/fine-impact-mills-and-classifier-mills/app-classifier-mill/>.
13. Trival, s.r.o. Trival. [Online] http://www.trival.cz/nerezovy_program/nerez_pdf.pdf.

14. AION CS, s.r.o. *Zákony pro lidi*. [Online] <http://www.zakonyprolidi.cz>.
15. Gajdušek, Jaroslav a Škopán, Miroslav. *Teorie dopravních a manipulačních zařízení*. místo neznámé : Brno: rektorát Vysokého učení technického, 1988. str. 277.
16. Pařízek, Tomáš, Oral, Jaroslav a Šikula, Jiří. *Dokumentace firmy Eveco Brno, Souhrnná technická zpráva*. Brno : Eveco Brno, 2014.

Seznam tabulek, obrázků a grafů

Tab. 2.1: Přehled emisních limitů vztahujících se na provoz kotle K3	17
Tab. 3.1 Porovnání suchých metod odsíření (5)	30
Tab. 3.2 Porovnání polosuchých metod odsíření (5)	31
Tab. 3.3 Porovnání mokrých metod odsíření (5)	31
Tab. 4.1 Základní parametry kotle K3	33
Tab. 4.2 Fyzikální a chemické vlastnosti bikarbonátu sodného	35
Tab. 4.3 Granulometrie bikarbonátu sodného dodávaného společností Soda Polska Ciech SA.....	35
Tab. 4.4 Srovnání sody bikarbony a trony	36
Tab. 4.5 Dosahované koncentrace emisí a procentní zastoupení síry v palivu	39
Tab. 4.6 Teploty spalin za kotlem	41
Tab. 4.7 Parametry spalovaného uhlí	45
Tab. 4.8 hustota prvků spalin.....	48
Tab. 4.9 parametry médií.....	53
Tab. 4.10 Bilance SO ₂ při výkonu kotle 45 [t/hod]	57
Tab. 4.11 Potřebné množství sorbentu	60
Tab. 4.12 Vypočtené hodnoty druhého šnekového dopravníku	61
Tab. 4.13 Základní technické údaje dopravníku č. 1 a č. 2	61
Tab. 4.14 Technické údaje mlýnu APP 200	63
Tab. 4.15 Části dopravní trasy	64
Tab. 4.16 Základní parametry ventilátoru	66
Tab. 4.17 Odhadovaný příkon el. zařízení.....	67
Tab. 4.18 Průměrné potřeby I/O signálů	67
 Obr. 3.1 Metody odsíření spalin3.3.1 Mokrý vápencová vypírka	22
Obr. 3.2 Schéma technologického procesu odsiřování mokrou vápno/vápencovou metodou. [2]	24
Obr. 3.3 Technologické schéma polosuché metody odsíření. [2].....	25
Obr. 3.4 Dávkování sorbentu do topeniště [2].....	27
Obr. 3.5 Aplikace sody Bikarbony	28
Obr. 3.6 Hydrogen uhličitán sodný před tepelnou aktivací	29
Obr. 3.7 Uhličitán sodný - porézní povrch	29
Obr. 4.1 Řez kotlem K3	34

Obr. 4.2 Klasické uspořádání systému pro skladování a dávkování sody bikarbony	37
Obr. 4.3 Instalace splitteru v provozu.....	37
Obr. 4.4 Splitter zajišťující rovnoměrnou distribuci vzduchu a bikarbony do jednotlivých trubních vedení	38
Obr. 4.5 Schéma posuzovaných míst vstříku bikarbony	42
Obr. 4.6 Dispoziční možnosti zaústění trysek na výškové úrovni + 15,432 m	43
Obr. 4.7 Dispoziční možnosti zaústění trysek na výškové úrovni + 10,284 m	44
Obr. 4.8 Satelitní snímek zákotlí	58
Obr. 4.9 Dispozice nového odprášení kotle K3	58
Obr. 4.10 3D snímek budoucího odprášení kotle K3	59
Obr. 4.11 Pohled na nejčastěji používanou konstrukci mlýna používaného	62
Obr. 4.12 Detail vnitřních částí mlýna.....	63
Obr. 4.13 Tisk obrazovky	Chyba! Záložka není definována.
graf 2.1 Vývoj emisí SO ₂ v letech 2007 – 2013.....	16
graf 2.2 Podíl jednotlivých sektorů na tvorbě SO ₂	17
graf 2.3 Emisní stropy TOL v jednotlivých etapách Národního přechodného plánu	19
graf 4.1 Histogram emisí SO ₂ na kotli K3 v roce 2015	40
graf 4.2 Pracovní bod ventilátoru	66

Seznam příloh

Příloha	Název dokumentu	Číslo dokumentu
A	Technologické schéma	BUK0020-00-01
B	Axonometrický pohled potrubní trasy	BUK0020-00-02
C	Mlýnice	BUK0020-00-03
D	Situační plán TOL	BUK0020-00-04